

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

1.	Allgemeines	2
2.	Versuchsparameter	2
3.	Herstellung, Lagerung und begleitende Untersuchungen am Beton	3
3.1	Herstellung	3
3.2	Lagerung	4
3.3	Begleitende Prüfungen	4
3.4	Biax-Probekörper	4
4.	Versuchsbeschreibung	4
4.1	Prüfstand	5
4.2	Lasteintragung	5
4.3	Belastungsregelung	6
4.4	Meßsysteme	6
4.4.1	Belastungsmessung	6
4.4.2	Verformungsmessung	7
4.4.3	Heizsystem und Temperaturmessung	7
4.5	Versiegelungseinrichtung	8
5.	Versuchsablauf	9
6.	Versuchsergebnisse	9
6.1	Prüfeinflüsse	9
6.1.1	Einfluß der Beschichtung der Probekörper	9
6.1.2	Einfluß der Dichtungsfolie	10
6.1.3	Einfluß der Probenschlankheit	10
6.2	Bruchverhalten	11
6.3	Bruchspannungen bei biaxialer Belastung	11
6.4	Spannungs-Dehnungs-Linien	12
7.	Zusammenfassung	14
8.	Schrifttum	15
9.	Anhang	16

1. ALLGEMEINES

Im Rahmen des F+E-Programmes für den HTR 500 beauftragte die Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig mit biaxialen Festigkeitsversuchen an versiegeltem Beton (Bestellung Nr. 675.513.1001.08000.30/200 vom 01.07.1988).

Die Untersuchung ist erforderlich, weil aus versuchstechnischen Gründen bisher nur Festigkeitsversuche an unversiegelten Probekörpern durchgeführt wurden. Der massige Beton eines SBRB ist jedoch von Liner, Wickelfertigteilen und Ankerplatten der Spannglieder umschlossen und dadurch weitgehend versiegelt.

Die Versuche werden entsprechend der von der Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH vorgegebenen technischen Versuchsspezifikationen HTR-5131-CB-GHRA 006064 vom 17.02.1989 durchgeführt /1/. Mit dem Zwischenbericht wurde im November 1989 über die zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossenen Versuche berichtet /2/.

2. VERSUCHSPARAMETER

Die Versuche wurden mit Basaltbeton nach HRB-Spezifikation durchgeführt. Als Prüftemperaturen waren 20 °C, 70 °C, 120 °C und 200 °C vorgesehen. Für die erhöhten Prüftemperaturen 70 °C, 120 °C und 200 °C wurden die versiegelten Proben mit 5 K/h aufgeheizt. Während der Aufheizphase und in der daran anschließenden einstündigen Haltephase, wurden die Probekörper mit 15 N/mm^2 in der Hauptachse (σ_1) belastet. Die Beanspruchung in der zweiten Belastungsachse wurde in Anlehnung an das gewünschte Spannungsverhältnis im Bruchversuch gewählt.

In den Bruchversuchen wurden fünf Spannungsverhältnisse $\kappa = \sigma_2/\sigma_1$ gewählt: $\kappa = 0,0; 0,2; 0,4; 0,6$ und $1,0$.

Für jede Kombination aus Prüftemperatur T und Spannungsverhältnis κ wurden im Schnitt drei Versuche durchgeführt. Dabei wurden die versiegelten Proben mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit ($\dot{\sigma} = 0,08 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$) bis zum Bruch

belastet. Mit Ausnahme der Versuche bei 200 °C wurden jeweils die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen ermittelt.

3. HERSTELLUNG, LAGERUNG UND BEGLEITENDE UNTERSUCHUNGEN AM BETON

3.1 Herstellung

Die Probekörper für die Biaxialversuche (Würfel 20/20/20 cm³) wurden am 07.04.1988 und am 07.02.1989 zusammen mit Proben für die Güteprüfung (Zylinder ø 15 cm, l = 30 cm und Würfel 15/15/15 cm³) und die Dauerstandversuche (Zylinder ø 8 cm, l = 30 cm) betoniert. Tabelle 1 zeigt die zu den Terminen zugehörigen Betonagenummern und die Zuordnung der Probenbezeichnungen.

Je Betoniertermin wurden die Mischungen in einem Zwangsmischer mit 350 dm³ Nenninhalt für ca. 220 - 250 dm³ verdichteten Frischbeton hergestellt. Die genaue Betonzusammensetzung enthält Tabelle 2.

Die Zuschläge und der Sand waren getrocknet. Der Verzögerer wurde mit dem Zugabewasser zugegeben. Die Mischzeit betrug jeweils drei Minuten.

Nach der Fließmittelzugabe wurde der Beton weitere drei Minuten gemischt. Für jede Mischung wurde vor und nach der Fließmittelzugabe das Ausbreit- und das Verdichtungsmaß, sowie nach der Fließmittelzugabe die Rohdichte und der Luftporengehalt bestimmt. Die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen gibt Tabelle 3 wieder.

Die 20er Würfel wurden in zerlegbaren Stahlschalungen, die Zylinder (ø 8 cm, l = 30 cm) in dichten Stahlschalungen betoniert. Für die 15er Würfel und die größeren Zylinder (ø 15 cm, l = 30 cm) wurden Kunststoffformen eingesetzt.

Die Verdichtung erfolgte in allen Fällen auf einem Rütteltisch. Die Verdichtungszeit betrug jeweils 60 Sekunden.

3.2 Lagerung

Die Proben wurden nach dem Betonieren feucht gehalten und nach einem Tag ausgeschalt. Danach wurden sie bis zur Güteprüfung bzw. bis zum jeweiligen Versuchsbeginn unter Wasser gelagert.

3.3 Begleitende Prüfungen

Die begleitenden Untersuchungen sollten zeigen, ob die jeweiligen Betonagen die Güteanforderungen erfüllen. Es wurde an je drei Würfeln die Druckfestigkeit nach 7, 28 und 90-tägiger Wasserlagerung bestimmt. Ferner wurde an drei Zylindern (\varnothing 15 cm, l = 30 cm) die Festigkeit und der Elastizitätsmodul ermittelt. Tabelle 4 enthält die Mittelwerte der genannten Prüfungen für beide Betonagetermine.

3.4 Biax-Probekörper

Für die biaxialen Versuche werden scheibenförmige Probekörper ($200 \cdot 200 \cdot 50 \text{ mm}^3$) benötigt. Je drei Proben werden aus einem 20er-Würfel nach frühestens 90 Tagen naß herausgesägt. Anschließend werden die Belastungsflächen naß plangeschliffen /3/.

Die Scheiben werden entsprechend ihrer Lage im Würfel beim Betonieren (Bild 1) mit oben (o), Mitte (m) und unten (u) bezeichnet, um eine eindeutige Zuordnung zu erhalten.

4. VERSUCHSBESCHREIBUNG

Die Versuche zum Festigkeits- und Verformungsverhalten des Basaltbetons an versiegelten Probekörpern werden im biaxialen Hochtemperatur-Prüfrahmen des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der Belastungs-, Regelungs- und Meßeinrichtungen findet sich in /4/.

4.1 Prüfstand

Eine Überblick über den Prüfstand gibt Bild 2. Der Belastungsrahmen besteht aus einer einteiligen, geschlossenen, senkrecht stehenden Stahlkonstruktion. Durch die Verwendung von zwei nebeneinander angeordneten, großzügig dimensionierten Stahlprofilen in geschlossener Bauweise ist die Steifigkeit des Belastungsrahmens so festgelegt, daß sie die Steifigkeit des Hydrauliksystems übertrifft. Diese große Steifigkeit ist vor allem bei weggeregelten Versuchen notwendig. Gleichzeitig fallen die Abmessungen kleiner aus als bei Verwendung eines vergleichbaren Spannbetonrahmens.

Der einteilige Rahmen bewirkt, daß Eigenverformungen aus Symmetriegründen immer gleichmäßig wirken. Das Problem der Raumstabilität des Probekörpermittelpunktes wird regelungstechnisch gelöst.

Zusammen mit der senkrechten Aufstellung gewährleistet die geringe Abmessung des Rahmens eine sehr gute Zugänglichkeit zum eigentlichen Prüfraum. Dadurch wird ein problemloses Einrichten des Probekörpers und der Meßsysteme sichergestellt. Die Installation der Heizvorrichtung konnte allein nach thermischen Gesichtspunkten vorgenommen werden, so daß eine gleichmäßige Temperaturverteilung im gesamten Probekörper erreicht wird.

Die Belastung der Probekörper erfolgt durch vier kraft- und wegregelbare Hydraulikzylinder mit jeweils 1000 kN Maximalkraft. Die Kräfte werden über wassergekühlte Druckstempel auf den Probekörper übertragen. Drei Druckstempel sind jeweils mit einer, als Kugelkalotte ausgebildeten sphärischen Lagerung der Lasteintragungskonstruktionen ausgestattet, um trotz geringfügiger Abweichungen in Parallelität und Rechtwinkligkeit des Probekörpers eine vollflächige Belastung zu gewährleisten.

4.2 Lasteintragung

Die Lasteinleitungskonstruktion beeinflusst die Versuchsergebnisse, insbesondere die biaxialen Festigkeitswerte. Zur Reduzierung der Querdehnungsbehinderung des Betons durch das Lasteinleitungssystem werden aufgelöste Belastungsplatten (Belastungsbürsten nach Hilsdorf /5/) benutzt. Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, daß die eingesetzten Belastungsbürsten (Bild 3) den

aus einer biaxialen Hochtemperaturprüfung resultierenden Anforderungen am besten gerecht werden.

4.3 Belastungsregelung

Die Biaxialanlage wird durch eine speziell entwickelte, servohydraulische 4fach-Kraft-Weg-Regelung gesteuert.

Die Regeleinrichtungen sind dabei so ausgelegt, daß jeder der vier Belastungszyylinder eine eigene Regelung für einen eigenen Hydraulikkreislauf mit Servoventil hat. Die Regelungen erhalten ihre Ist-Werte von dem am jeweiligen Zylinder angebauten Wegaufnehmer bzw. von der im jeweiligen Zylinder eingebauten Kraftmeßdose. Dadurch ist eine separate Regelung jedes Zylinders möglich, d.h. er kann kraft- oder weggeregelt werden, kann eine vorgewählte Belastungsgeschwindigkeit fahren und einem vorgewählten Belastungspfad folgen.

Die achsenweise Kopplung der einzelnen Regelungen erlaubt den Versuchsablauf unter biaxialen Belastungsverhältnissen. Die beiden gegenüberliegenden Zylinder laufen dann synchron gegenläufig (closed-loop-Regelung), d.h. bei einem Anstieg der Belastung, kraft- oder weggeregelt, übernimmt in jeder Achse eine Regelung die Führung, der zweite Regelkreis arbeitet dann als Seitenregler. Eine Wegüberwachungsvorwahl begrenzt bei Bruch der Probekörper Prüfzylinderhub, so daß eine Zerstörung der Belastungseinrichtungen ausgeschlossen ist.

4.4 Meßsysteme

Bei den Untersuchungen zur Ermittlung des biaxialen Hochtemperaturverhaltens von Beton müssen während der Versuche die in die Probekörper eingebrachten Kräfte, deren Verformungen und Temperaturen gemessen werden.

4.4.1 Belastungsmessung

Die Messung der in die Probekörper eingebrachten Kräfte erfolgt über vier, jeweils zwischen Zylinder und Probekörper eingeschaltete Kraftmeßdosen. Die Anbringung von zwei Kraftmeßdosen pro Achse bietet die Möglichkeit, den Einbau und Zustand der Probekörper zu überwachen, denn nur ein genau mittig ein-

gebauter, planparalleler und rechtwinkliger Probekörper führt dazu, daß beide Kraftanzeigen einer Achse den notwendigerweise gleichen Wert anzeigen. Außerdem ist es so möglich, während eines Versuchs Abweichungen festzustellen und so auf Fehler oder aber auch auf Kräfteumlagerungen im Probekörper zu schließen. Da sich die Kraftmeßdosen im gekühlten Bereich der Druckstempel befinden, können Fehler durch Temperatureinflüsse nicht auftreten.

Durch diese direkte Kraftmessung entfallen die Fehlermöglichkeiten, die sich durch indirekte Methoden, wie Messung mit Öldruckaufnehmern, ergeben können. Es sind hier keine Kalibrierversuche notwendig, und das zeitlich konstante Einhalten der Genauigkeit der Meßwerte kann überwacht werden.

4.4.2 Verformungsmessung

Die Verformungen werden durch induktive Wegaufnehmer W5TK der Fa. Hottinger Baldwin Meßtechnik gemessen. Dabei müssen wegen der auftretenden hohen Temperaturen einige Besonderheiten beachtet werden. Da der eigentliche Wegaufnehmer außerhalb des Hochtemperaturbereichs angebracht werden muß, müssen die Verformungswege aus dem heißen Bereich durch ein Meßgestänge herausgeführt werden. Bild 4 zeigt das an einem Probekörper aufgebaute Dehnungsmeßsystem.

Das Meßgestänge - aus Stahl für Raumtemperatur, aus Quarzglas für höhere Temperaturen - bestehen jeweils aus einem Rohr und einer darin verlaufenden Stange. Sie stützen sich in punktgelagerten Klötzen ab, die auf dem Probekörper durch Klemmen zuverlässig fixiert sind. Die Gestänge enden auf Parallelchenkern, an denen die aufgebauten induktiven Wegaufnehmer die Differenzwege messen. Durch die veränderbare Anbringung der Klötze auf dem Probekörper werden Endflächeneffekte ausgeschaltet, die bei Messungen direkt zwischen den Stempeln zu Verfälschungen der Ergebnisse führen. Bei 200 °C muß wegen des Versiegelungsgefäßes auf den Einsatz einer Verformungsmessung verzichtet werden.

4.4.3 Heizsystem und Temperaturmessung

Die Probekörper werden elektrisch mit einem in zwei gleiche Hälften geteilten Kammerofen beheizt. Die beiden hängend angeordneten Ofenteile sind verfahr-

bar. Sie werden zum Probe- und Meßsystemeinbau auseinandergefahren und während der Versuche bei erhöhten Temperaturen geschlossen. Der Ofenraum umfaßt dann den Probekörper, die Belastungsbürsten und einen kleinen Teil der Belastungsstempel.

Drei thermisch durch Konvektionsbleche entkoppelte, einzeln regelbare Heizzonen sorgen für eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Ofenraum und beheizen die Probekörper indirekt über die beiden freien, flächenmäßig größten Oberflächen.

Eine 3-Zonen-PID-Programmregelung übernimmt das geregelte Aufheizen des Ofens und die Realisierung definierter Temperaturverläufe. Die Temperaturverläufe während der Aufheizung und der Haltezeit von 1 h werden mit jeweils vier Thermoelementen gemessen.

4.5 Versiegelungseinrichtung

Die bestehende Anlage mußte durch ein Versiegelungsgefäß ergänzt werden, um die Versuche unter versiegelten Bedingungen bei 200 °C durchführen zu können. Die Versiegelungsvorrichtung (Bild 5) ist in der HRB-Spezifikation /1/ genau beschrieben. Die Abdichtung zwischen der Probenoberfläche und den Belastungsbürsten wird durch Kupferfolien erreicht. Zur Aufnahme des entstehenden Dampfdruckes kommen Foliendicken von 0,1 mm bis 0,5 mm in Frage. Wie in Abschnitt 6.1.2 noch näher begründet, wurden letztlich die dickeren Folien gewählt. Ein bei Kontrollmessungen im Versiegelungsgefäß festgestellter Druckabfall zeigte, daß noch Verbesserungen erforderlich waren. Bild 6 zeigt den in den meisten Versuchen eingesetzten Versiegelungsbehälter. Im geöffneten Zustand ist zu sehen, daß gegenüber der ursprünglichen Ausführung die Eckbereiche gesondert über ein Verspannkreuz fixiert werden. So wird das Abheben der Ecken beim Belasten vermieden. Bild 7 zeigt das geschlossene Versiegelungsgefäß mit angeschlossenem Druckaufnehmer zum Überwachen des Innendrucks und den bereits aufgeklebten externen Thermoelementen für die Steuerung der Ofentemperatur. Die Prüfkörpertemperatur wird im Inneren des Versiegelungsgefäßes direkt auf der Probenoberfläche gemessen.

5. VERSUCHSABLAUF

Für die Untersuchungen bei Raumtemperatur werden die Probekörper mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit ($\sigma = 0,08 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$) bis zum Bruch belastet. Das zu Beginn gewählte Belastungsverhältnis $\kappa = \sigma_2/\sigma_1$ bleibt während des Versuchs konstant. Der beschriebene Ablauf des Bruchversuchs gilt auch für die erhöhten Prüftemperaturen. Hinzu kommt lediglich jeweils die Aufheiz- und Haltephase.

Die Proben werden bei Raumtemperatur eingebaut. Für die Aufheiz- und Haltezeit werden die Prüfkörper in der Hauptbelastungsachse mit 15 N/mm^2 belastet. Die Vorlast in der zweiten Belastungsachse ist entsprechend dem jeweiligen Spannungsverhältnis niedriger.

Nach dem Aufbringen der Vorlast werden die Proben mit 5 K/h auf die Prüftemperatur aufgeheizt und vor dem eigentlichen Bruchversuch eine Stunde zur Temperierung bei dieser Temperatur belassen.

6. VERSUCHSERGEBNISSE

6.1 Prüfeinflüsse

6.1.1 Einfluß der Beschichtung der Probekörper

Die Versiegelung der Probekörper erfolgt bei den Versuchen mit einer Prüftemperatur von $70 \text{ }^\circ\text{C}$ bzw. $120 \text{ }^\circ\text{C}$ durch eine Beschichtung. Vergleichsversuche bei Raumtemperatur bestätigen, daß die Beschichtung das Festigkeits- und Verformungsverhalten nicht beeinflusst. In zusätzlichen Versuchen wurde die thermische Beständigkeit der gewählten Beschichtung überprüft. Die Funktionsfähigkeit wurde dabei durch vergleichende Gewichtsbestimmungen vor und nach der Temperierung kontrolliert.

In Bild 8 ist zu erkennen, daß ebenso wie das Festigkeits- und Verformungsverhalten auch das Bruchbild nicht durch die Beschichtung verändert wird.

6.1.2 Einfluß der Dichtungsfolie

In den Vorversuchen wurden drei Foliendicken bei einaxial belasteten Proben bei Raumtemperatur untersucht. Die verschiedenen Foliendicken (0,015 mm (Aluminium), 0,1 mm (Kupfer) und 0,5 mm (Kupfer)) hatten nur wenig Einfluß auf die Verformungen im Bruchversuch. Im Vergleich zu Proben, die ohne Folien belastet wurden, waren lediglich die Dehnungen in der Belastungsachse (ϵ_1) geringer (Bild 9). Dies galt insbesondere für die Versuche mit den dickeren Folien.

Ein Vergleich der Festigkeiten (Bild 10) zeigt, daß bereits geringe Foliendicken ($d = 0,015$ mm) zu einem geringfügigen Festigkeitsanstieg führen. Die zur Aufnahme des Dampfdruck erforderlichen Foliendicken von 0,1 bis 0,5 mm lassen bei Raumtemperatur Festigkeitswerte erwarten, die um etwa 25 % über den ohne Folie bestimmten Werten liegen.

Da die Foliendicke - im für die Versiegelung interessanten Bereich - keinen signifikanten Einfluß auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten hat, erfolgt die Wahl der Foliendicke allein unter dem Gesichtspunkt der Abdichtung.

6.1.3 Einfluß der Probenschlankheit

Die Schlankheit der Proben für die Biaxialversuche ist mit $\lambda = 4$ im Vergleich zu üblichen Probekörpern wie Würfel ($\lambda = 1$) und Zylinder ($\lambda = 2$) recht groß. Eine gesonderte Versuchsreihe, die über das eigentliche Versuchsprogramm hinausging, sollte deshalb den Einfluß der Schlankheit beleuchten. Dies ist u.a. auch erforderlich, um die mit unterschiedlichen Probekörperformen gewonnenen Ergebnisse miteinander vergleichen zu können.

Alle Versuche wurden mit massiven Belastungsplatten durchgeführt. In Tabelle 5 werden die Mittelwerte aus jeweils drei Versuchen wiedergegeben. Der auffallend große Mittelwert bei einer Schlankheit $\lambda = 4$ ist im Gegensatz zu den Mittelwerten für kleinere Schlankheit mit einer für einaxiale Versuche großen Streuung verbunden ($v = 9,3$ %).

6.2 Bruchverhalten

Die Probekörper versagen bei allen vier untersuchten Temperaturstufen mit einem explosionsartigen Knall. Diese Art des Versagens deutet auf ein hohes Energiespeichervermögen und ein recht sprödes Verhalten hin (siehe auch σ - ϵ -Linien).

Die Risse verlaufen bei allen Versuchstemperaturen durch die Zuschläge hindurch. Die Rißflanken sind stark zerklüftet und lassen auf eine entsprechend hohe Verzahnung der Rißufer schließen.

Der Verlauf der Risse bei unterschiedlichen Belastungsverhältnissen κ deutet für die Prüftemperaturen 20 °C, 70 °C und 120 °C darauf hin, daß durch die speziellen Lasteinleitungsbürsten nahezu keine Behinderung der Betonquerdehnung vorhanden ist (vgl. Bild 8). In den Versuchen bei 200 °C wird durch die zwischenliegende Kupferfolie die Betonquerdehnung behindert. Dies spiegelt sich auch im Rissbild wieder.

6.3 Bruchspannungen bei biaxialer Belastung

Die Einzelergebnisse und die jeweiligen Mittelwerte der im Bruchversuch bestimmten Festigkeiten der Basaltbetonproben werden in Tabelle 6 wiedergegeben. Für die 200 °C-Versuche wird zum Teil auf die Angabe von Mittelwerten verzichtet, wenn die jeweilige Anzahl erfolgreicher Versuche dies nicht zuläßt. Die ungewöhnlich große Anzahl von Fehlversuchen bei dieser 200 °C ist auf Probleme mit der ursprünglichen Versiegelungseinrichtung /1/ zurückzuführen.

In Bild 11 sind in der σ_1 - σ_2 -Ebene die gemessenen Festigkeitswerte der unteren drei Temperaturstufen (20 °C, 70 °C und 120 °C) dargestellt. Die Bruchspannungen sind auf die mittlere einaxiale Probenfestigkeit bei 20 °C bezogen. Die Bruchgrenzkurven basieren auf den rechnerischen Mittelwerten der Festigkeiten bei der jeweiligen Prüftemperatur.

Auffallend ist der große Festigkeitszuwachs bei zweiaxialer Beanspruchung, gegenüber der einachsigen Festigkeit. Ursache hierfür können die oben bereits

erwähnte große Verzahnung der RiBufer und die starke Zerklüftung der RiBflan-ken sein.

Die Festigkeit des versiegelten Betons wird bei 70 °C unter zweiachsiger Beanspruchung stärker als unter einaxialer Belastung abgemindert. Mit weiter steigender Temperatur nehmen die Festigkeitswerte der versiegelten Proben ab. Dies erfolgt weitgehend unabhängig vom Belastungsverhältnis κ . Die Differenzen nehmen nicht gleichmäßig mit der Temperatur zu. Der Unterschied zwischen den 20 °C- und den 70 °C-Versuchen ist geringer, als der zwischen den Versuchen bei 70 °C und 120 °C. Die Form der Bruchgrenzlinie wird bei den vorliegenden Versuchen nicht von der Temperaturhöhe beeinflusst. Für die drei Temperaturstufen liegt das Maximum der Bruchgrenzlinien etwas oberhalb von $\kappa = 0,4$.

Werden die in den 200 °C-Versuchen erzielten Ergebnisse (Bild 12) mit den anderen Versuchsergebnissen vergleichen, so ist stets zu einschränkend zu beachten, daß die 200 °C-Werte mit einer Lasteinleitung gewonnen werden, die die Querdehnung des Betons behindert. Die 200 °C-Bruchgrenzlinie der versiegelten Versuche liegt trotz dieser festigkeitserhöhenden Lasteinleitung unterhalb der in /3/ bestimmten 200 °C-Werte für den unversiegelten Beton. Die 200 °C-Festigkeitswerte liegen zwischen den Bruchgrenzlinien für 70 °C und 120 °C. Die größte Festigkeitserhöhung infolge biaxialer Beanspruchung wird im Vergleich den anderen versiegelten Versuchen zu höheren Belastungsgraden verschoben und ist etwa bei $\kappa = 0,67$ erreicht.

Aussagen über die Streuungen können jeweils für die Belastungsverhältnisse $\kappa = 0,0$ und $\kappa = 1,0$ gemacht werden. Für diese beiden Belastungsverhältnisse wurden je fünf Versuche bei Raumtemperatur durchgeführt, um eine ausreichende Basis für statistische Aussagen zu haben. Die Variationskoeffizienten sind für einachsige Belastung $v = 5,9 \%$ und für zweiachsige Belastung $v = 8,5 \%$.

6.4 Spannungs-Dehnungs-Linien

Mit Ausnahmen von zwei zusätzlichen Versuchen (20 °C, $\kappa = 1,0$) zur statistischen Absicherung, wurden bei allen Versuchen die Spannungs-Dehnungs-Linien für die drei prinzipiellen Richtungen bestimmt. Die aus durchschnittlich drei Versuchen je Temperatur und Spannungsverhältnis ermittelten σ - ε -Diagramme

werden in den Bildern 13 bis 27 wiedergegeben. In den Bildern 28, 29 und 30 sind die verschiedenen σ - ε -Linien für die jeweilige Prüftemperatur nochmals zusammen dargestellt.

Die Spannungs-Dehnungs-Linien für die Hauptbelastungsachse zeigen nur einen geringen Anteil plastischer Verformungen. Dies stimmt mit dem zuvor beschriebenen spröden Versagen überein.

Der Verlauf der σ_1 - ε_1 -Linien zeigt für alle Prüftemperaturen eine Abhängigkeit vom Belastungsverhältnis. Mit steigender Belastung in der zweiten Achse werden diese Verformungen bei gleich großen Spannungen σ_1 geringer. Für die κ -Werte zwischen $\kappa = 0,2$ und $\kappa = 0,67$ sind die σ_1 - ε_1 -Linien nahezu deckungsgleich. Die größte Bruchstauchung wird sowohl bei 20 °C als auch bei 70 °C mit $\kappa = 0,4$ erreicht. Bei 120 °C wird die größte Bruchstauchung für $\kappa = 0,2$ gemessen. In allen Fällen verläuft die σ_1 - ε_1 -Linie für $\kappa = 0,67$ zwischen denen für $\kappa = 0,2$ bzw. $\kappa = 0,4$.

Die Dehnung in der zweiten Belastungsachse (ε_2) wird am deutlichsten vom Belastungsverhältnis beeinflusst. Mit anwachsendem κ geht die Expansion bei einachsiger Beanspruchung in eine Stauchung bei symmetrisch biaxialer Beanspruchung über. Dieser Wechsel findet unabhängig von der Temperatur etwa bei $\kappa = 0,2$ statt.

Die Dehnungen in der freien Achse (ε_3) erreichen bei 20 °C und 70 °C mit zunehmendem Spannungsverhältnis größere Endwerte. Für 120 °C ist dies nicht festzustellen. Eine durchaus zu erwartende Abhängigkeit vom Belastungsverhältnis κ ist nicht eindeutig erkennbar. Liegen die einzelnen σ_1 - ε_3 -Linien bei 20 °C noch für alle Belastungsverhältnisse in einem engen Streubereich, so treten mit steigender Temperatur zunehmend Unterschiede zwischen den einzelnen Spannungs-Dehnungs-Linien zutage. Diese Unterschiede sind bei den 70 °C-Versuchen bereits für niedrige Belastungen festzustellen. Dagegen treten sie in den 120 °C-Versuchen erst ab etwa $0,6 \cdot \beta_p$ auf.

Bei allen Angaben zum Verformungsverhalten müssen die aus Inhomogenitäten und unterschiedlichen Festigkeiten resultierenden Streuungen beachtet werden. Auf die entsprechenden Variationskoeffizienten wurde bereits bei den Festigkeitswerten hingewiesen.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Bericht gibt die bei 20 °C, 70 °C, 120 °C und 200 °C erzielten Ergebnisse der Festigkeits- und Verformungsuntersuchungen in biaxialen Bruchversuchen an versiegeltem HRB-Basaltbeton wieder. Auf die Probenherstellung und -vorbereitung, sowie auf Begleituntersuchungen wird ausführlich eingegangen. Die Versuchseinrichtung und -durchführung werden beschrieben.

Zusätzlich zum eigentlichen Versuchsprogramm ausgeführte Untersuchungen beleuchten die Einflüsse, die die Beschichtung der Proben, die zur Versiegelung bei 200 °C notwendige Dichtungsfolie und die Probenschlankheit auf die gemessenen Festigkeits- und Verformungswerte haben.

Unter biaxialer Beanspruchung sind die Bruchspannungen bei allen Prüftemperaturen deutlich größer als bei einaxialer Belastung. Dies gilt bereits bei geringen Belastungen in der zweiten Achse. Das Festigkeitsmaximum wird bei Temperaturen zwischen 20 °C und 120 °C etwas oberhalb von $\kappa = 0,4$ erreicht. Bei 200 °C wird das Maximum weiter zu höheren κ -Werten verschoben. Ursache dürfte hierfür die Querdehnungsbehinderung durch die zwischenliegende Kupferfolie der Versiegelung sein. Sofern nicht Reibungsbehinderungen ins Spiel kommen, nimmt die Festigkeit der versiegelten Betonproben mit steigender Temperatur ab.

Die Proben versagen bei allen Prüftemperaturen spröde und weisen sehr zerklüftete Rißflächen auf.

Für alle Prüftemperaturen liegen die Spannungs-Dehnungs-Linien der Hauptbelastungsachse ϵ_1 für κ -Werte zwischen 0,2 und 0,67 sehr eng beieinander. Für $\kappa = 0,0$ werden die größten, für $\kappa = 1,0$ die geringsten Stauchungen ermittelt. In der zweiten Belastungsachse (ϵ_2) wechseln die Verformungen etwa für $\kappa \geq 0,4$ von einer Expansion zur Stauchung. In der freien Achse (ϵ_3) ist keine eindeutige Abhängigkeit der Dehnungen vom Belastungsverhältnis festzustellen.

8. SCHRIFTTUM

- /1/ HRB-Versuchsspezifikation HTR-5131-CB-GHRA 006064 vom 17.02.1989
- /2/ Thienel, K.-Ch.; Diederichs, U.: HTR-Betonversuche, Biaxiale Festigkeitsversuche an versiegeltem Beton, Zwischenbericht über eine im Auftrag der Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH, Mannheim, durchgeführte Untersuchung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, November 1989
- /3/ Diederichs, U.; Ehm, C.: Mechanisches Verhalten von HTR-Beton, Teil 5: Biaxiale Druckversuche. Abschlußbericht über eine im Auftrag der Hochtemperatur-Reaktorbau GmbH, Mannheim, durchgeführte Untersuchung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Juni 1986
- /4/ Schneider, U.; Diederichs, U.; Ehm, C.; Hinrichsmeyer, K.: Arbeitsbericht 1981 - 1983 des Sonderforschungsbereichs 148, Brandverhalten von Bauteilen. Teilprojekt B3, S. 120 ff. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Mai 1983
- /5/ Hilsdorf, H.: Die Bestimmung der zweiachsigen Festigkeit des Betons. Heft 173 des DAFStb, Berlin 1965

9. ANHANG

Tabelle 1: Betoniertermine, Betonagenummern und Bezeichnung der Probekörper

Betoniertermin/ Betonage Nr.	Proben- bezeichnung	Probenart	Proben- anzahl
07.04.1988/ Nr. 72/88	HA41 - HA418	Würfel 20/20/20 cm ³	18
	HAW41 - HAW49	Würfel 15/15/15 cm ³	9
	HA4101-HA4136	Zylinder ø 8 cm, l = 30 cm	36
	HA41 - HA43	Zylinder ø 15 cm, l = 30 cm	3
07.02.1989/ Nr. 27/89	HA51 - HA518	Würfel 20/20/20 cm ³	18
	HAW51 - HAW59	Würfel 15/15/15 cm ³	9
	HA5101-HA5136	Zylinder ø 8 cm, l = 30 cm	36
	HA51 - HA53	Zylinder ø 15 cm, l = 30 cm	3

Tabelle 2: Betonzusammensetzung

Zementgehalt (HOZ 45 L, MONTAN)	390	kg/m ³
Wassergehalt	168	kg/m ³
Wasser-Zement-Wert	0,43	-
Zuschlag	1854	kg/m ³
Zusatzstoff (EFA Füller Typ BM II)	60	kg/m ³
Zusatzmittel		
Plastiment Retarder	0,2	% v. Z.G.
Sikament 20	1,2	% v. Z.G.

Tabelle 3: Frischbetoneigenschaften

		HA4	HA5
Ausbreitmaß ohne B.V.	cm	32	31
mit B.V.	cm	40	40
Verdichtungsmaß ohne B.V.	-	1,17	1,19
mit B.V.	-	1,05	1,04
Rohdichte	kg/dm ³	2,50	2,50
Luftporengehalt	Vol.-%	1,15	1,50

Tabelle 4: Begleitende Festbetonprüfungen

		HA4	HA5
Würfeldruckfestigkeit (15/15/15 cm ³)			
7 Tage	N/mm ²	55	53
28 Tage	N/mm ²	70	70
90 Tage	N/mm ²	82	79
Zylinderdruckfestigkeit (ϕ 15 cm, l = 30 cm)			
90 Tage	N/mm ²	73,9	73,1
Elastizitätsmodul (ϕ 15 cm, l = 30 cm)			
90 Tage	kN/mm ²	49,3	49,0

Tabelle 5: Einfluß der Probengeometrie auf die Festigkeitswerte

Probenform	Mittlere Festigkeit in N/mm ² bei einer Schlankheit von			
	k = 1	k = 2	k = 3	k = 4
Würfel 15/15/15 cm ³	80,5	-	-	-
Zylinder ϕ 8 cm	82,2	78,0	79,8	-
Scheiben d = 5 cm b = 5 cm	99,2 106,2	73,2	-	76,0
Scheiben d = 5 cm b = 10 cm	-	-	-	75,3
Scheiben d = 5 cm b = 20 cm	-	70,8	64,2	79,3
Mittelwert	92,0	74,0	72,0	76,9

Tabelle 6 : Festigkeiten aus biaxialen Druckversuchen an Basaltbeton

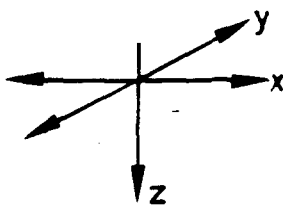
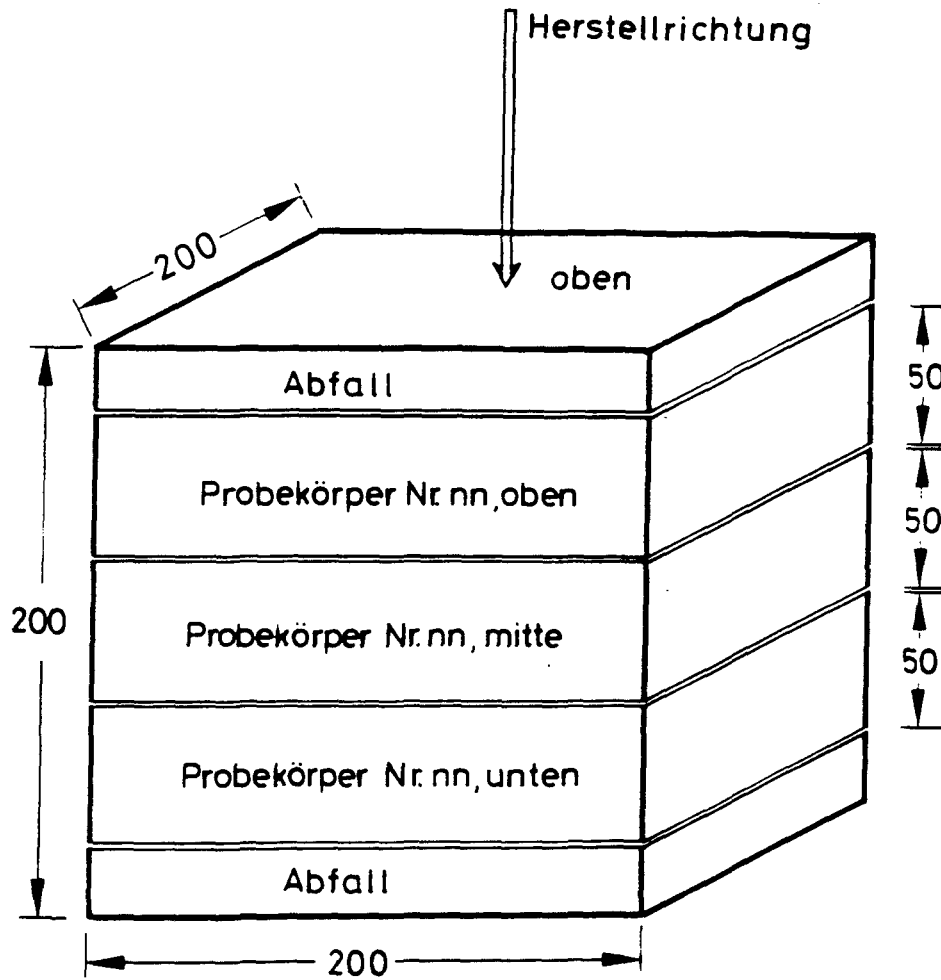
T	κ	Probe	$\sigma_{1,u}$	$\sigma_{2,u}$	$\sigma_{1,u}$	$\sigma_{2,u}$	$\frac{\sigma_{1,u}}{46,9}$	$\frac{\sigma_{2,u}}{46,9}$
(°C)	-	Nr.	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	-	-
20	0,00	HA45 o	45,0	0,0	46,9	0,0	1,00	0,00
		HA416m	47,3	0,0				
		HA51 u	44,0	0,0				
		HA53 o	47,0	0,0				
		HA518m	51,2	0,0				
	0,20	HA415m	72,5	14,7	72,6	14,8	1,55	0,31
		HA415u	79,4	16,2				
		HA514u	66,0	12,8				
	0,40	HA45 m	80,0	31,0	78,3	30,8	1,67	0,66
		HA46 u	87,5	34,5				
		HA53 u	67,5	27,0				
	0,67	HA45 u	82,5	51,5	74,8	47,5	1,59	1,01
		HA413o	75,3	48,0				
		HA513u	66,5	43,0				
	1,00	HA411u	74,0	74,0	65,4	65,4	1,39	1,39
		HA416o	65,0	65,0				
		HA57 u	60,5	60,5				
		HA51 o	65,0	65,0				
		HA51 m	62,5	62,5				
70	0,00	HA46 o	42,0	0,0	45,5	0,0	0,97	0,00
		HA411m	46,0	0,0				
		HA412m	48,5	0,0				
	0,20	HA48 m	68,0	13,0	65,5	13,1	1,40	0,28
		HA417o	57,0	11,8				
		HA417u	71,5	14,5				
		HA518u	**	**				
	0,40	HA48 o	66,8	27,0	71,4	27,7	1,52	0,59
		HA414m	69,5	26,5				
		HA416u	78,5	29,5				
	0,67	HA48 u	73,5	46,0	64,8	39,0	1,38	0,83
		HA412o	61,5	34,5				
		HA415o	59,5	36,4				
	1,00	HA414o	53,0	53,0	57,7	57,7	1,23	1,23
		HA414u	66,0	66,0				
		HA417m	54,5	54,5				

** Der Versuch mußte vor Erreichen der Bruchspannung abgebrochen werden.

Fortsetzung Tabelle 6 : Festigkeiten aus biaxialen Druckversuchen an Basaltbeton

T	κ	Probe	$\sigma_{1,u}$	$\sigma_{2,u}$	$\sigma_{1,u}$	$\sigma_{2,u}$	$\frac{\sigma_{1,u}}{46,9}$	$\frac{\sigma_{2,u}}{46,9}$
(°C)	-	Nr.	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	-	-
120	0,00	HA53 m	37,3	0,0	36,6	0,0	0,78	0,00
		HA510u	35,4	0,0				
		HA515o	37,2	0,0				
	0,20	HA514m	49,1	9,4	48,1	9,2	1,03	0,20
		HA517o	48,5	9,0				
		HA517u	46,8	9,2				
	0,40	HA57 o	48,4	20,3	48,7	20,3	1,04	0,43
		HA517m	49,0	20,2				
	0,67	HA54 o	50,8	35,0	49,0	32,7	1,04	0,70
		HA57 m	48,5	31,5				
		HA515u	47,7	31,5				
	1,00	HA55 u	43,1	43,1	43,5	43,5	0,93	0,93
		HA510m	42,6	42,6				
		HA514o	44,8	44,8				
200	0,00	HA52 m	**	**			0,85	0,00
		HA52 u	**	**				
		HA511o	40,0	0,0				
	0,20	HA52 u	**	**			1,09	0,22
		HA54 m	**	**				
		HA513m	51,0	10,2				
	0,40	HA52 o	71,0	28,5	54,5	22,0	1,16	0,47
		HA54 u	38,0	15,5				
	0,67	HA55 m	**	**			1,28	0,88
		HA512u	60,0	41,2				
		HA516m	**	**				
	1,00	HA511m	**	**	55,9	54,7	1,19	1,17
		HA511u	52,8	52,8				
		HA512m	59,0	56,5				
		HA516o	**	**				

** Der Versuch mußte vor Erreichen der Bruchspannung abgebrochen werden.



x: Prüfrichtung P_x ; Sägerichtung
y: Prüfrichtung P_y
z: Herstellrichtung

Bild 1: Herstellung der Probekörper

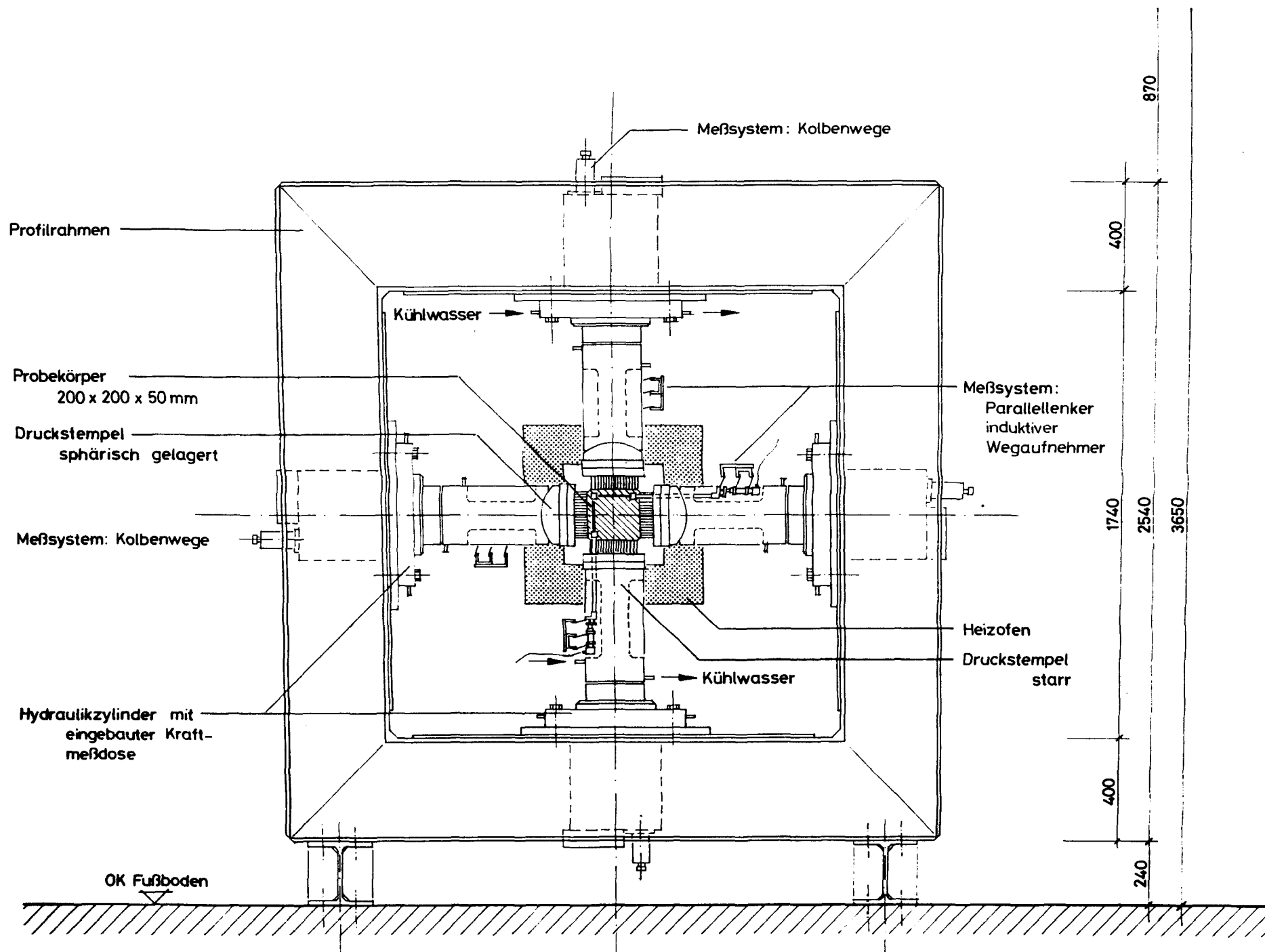
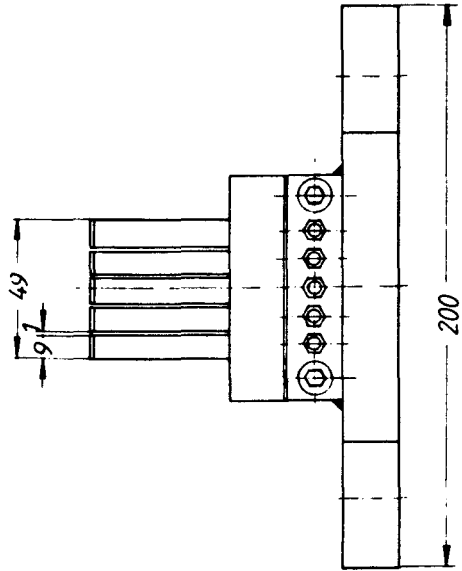


Bild 2: Aufbau des Prüfstandes



Lasteintragungskonstruktion
 Bürste II
 Material: X 15CrNiSi 25 20
 Einsatz : bis 1000 kN
 bis 800 °C

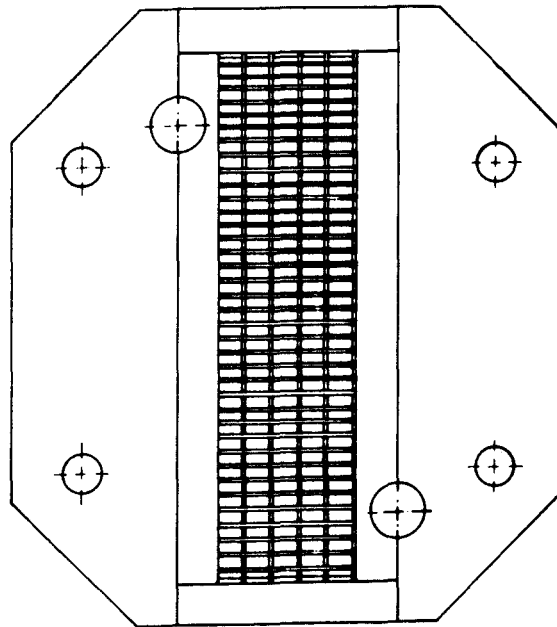
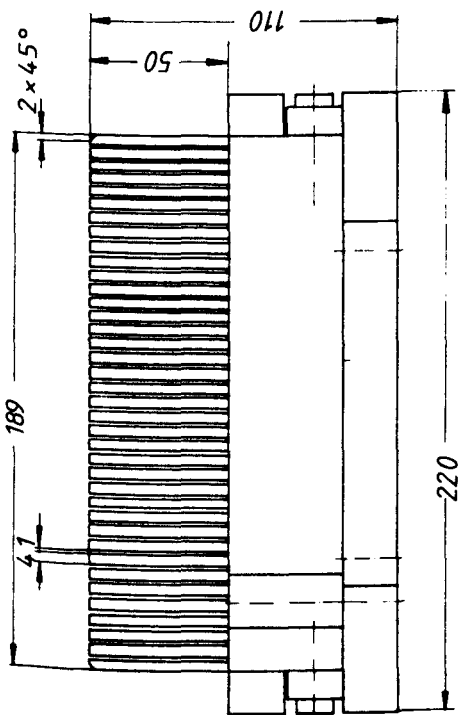


Bild 3: Belastungsbürsten

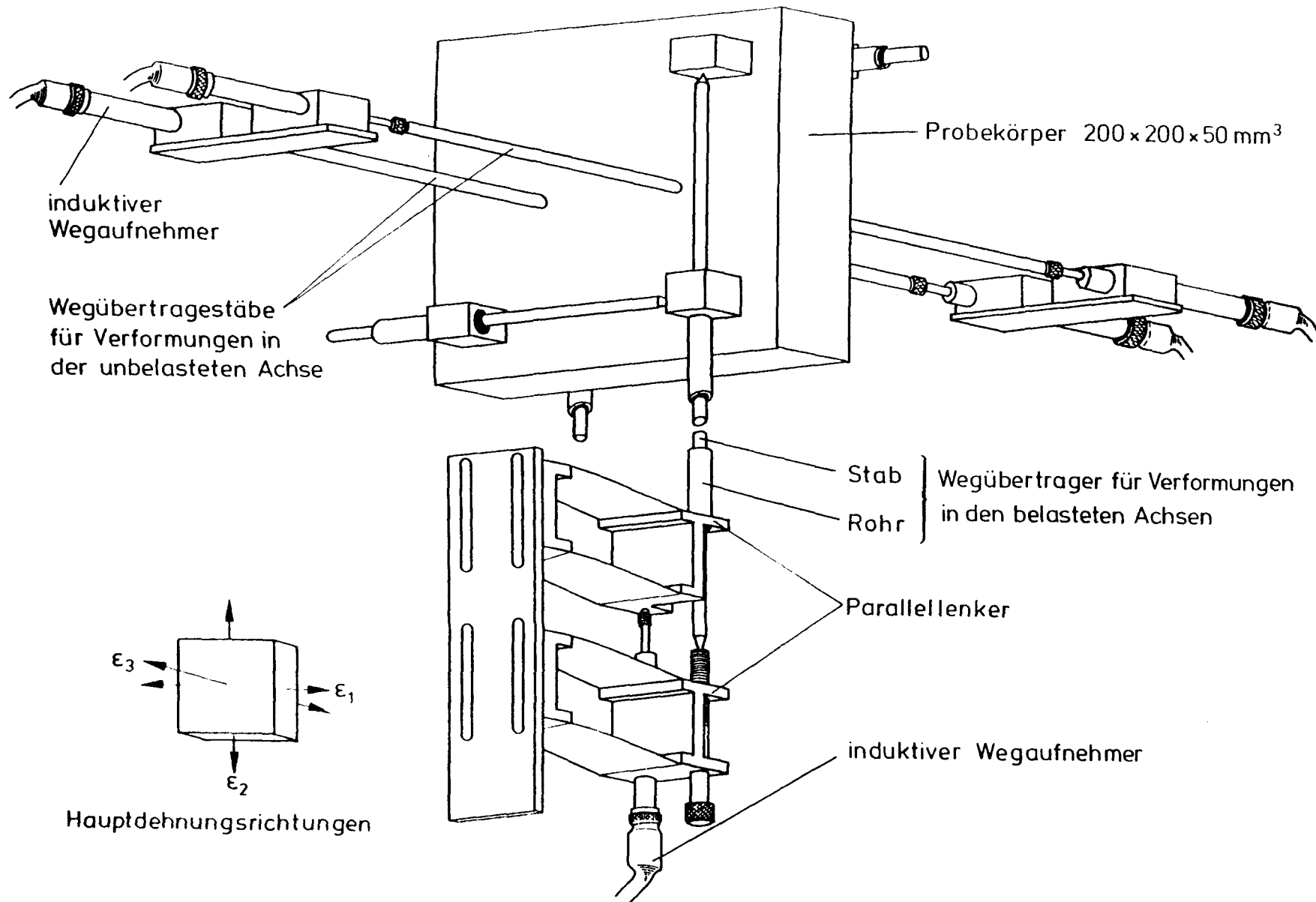


Bild 4: Verformungsmeßsystem

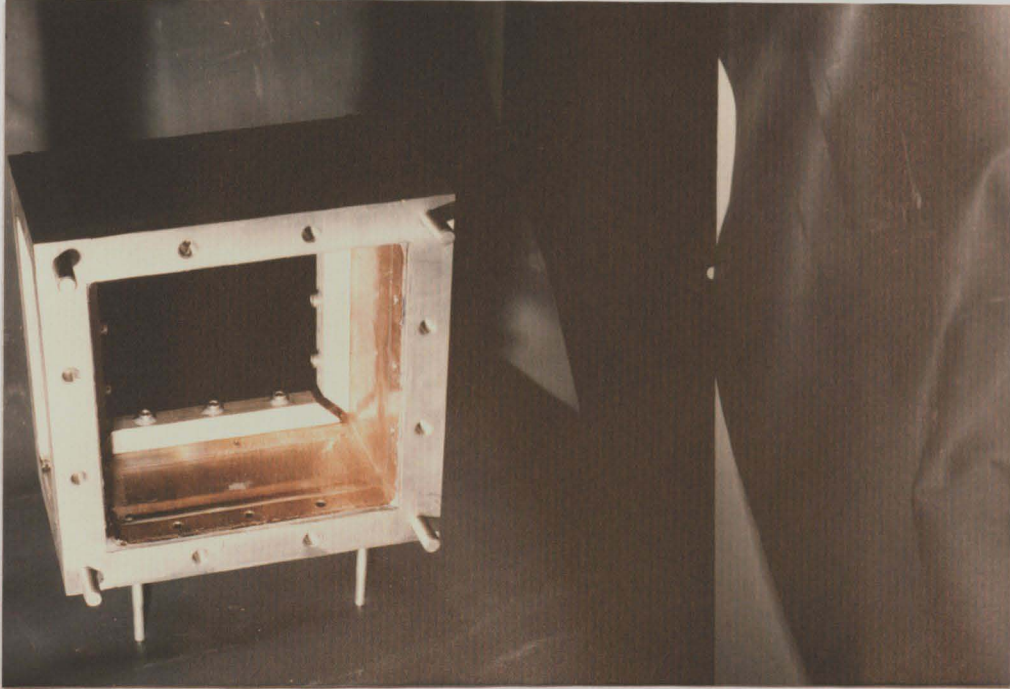


Bild 5: Versiegelungsgefäß nach der HRB-Spezifikation /1/

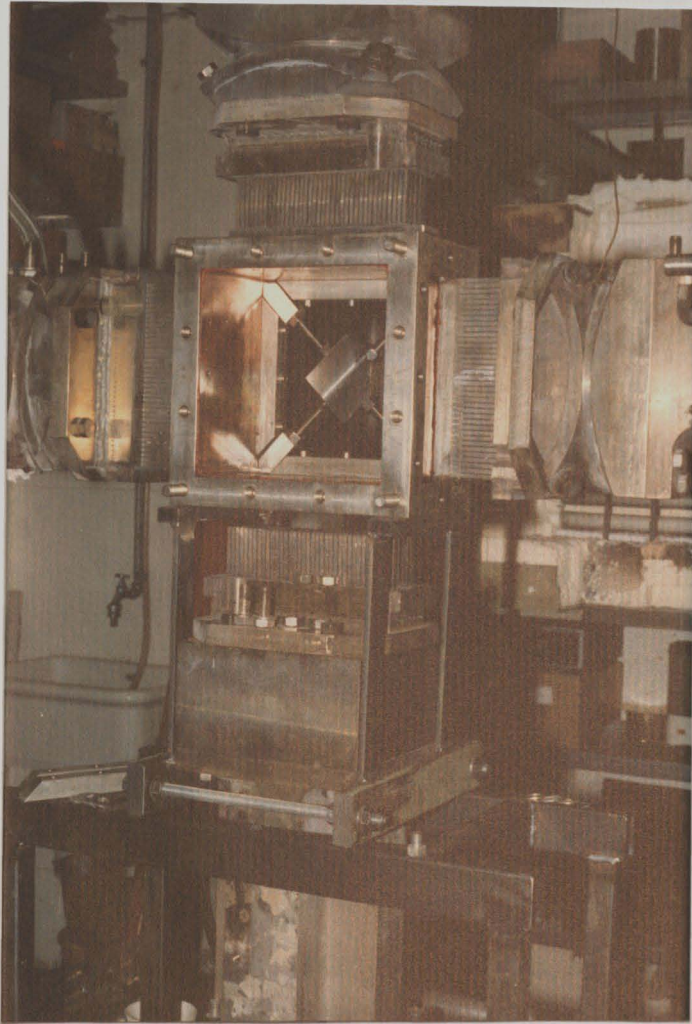


Bild 6: Verbesserte Ausführung des Versiegelungsgefäßes

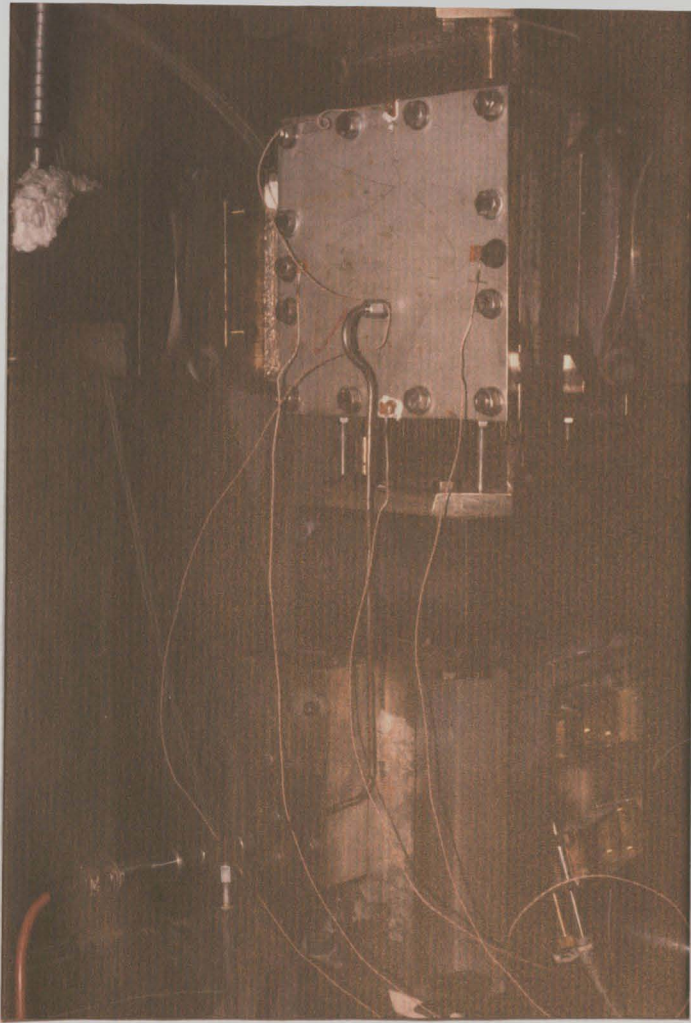


Bild 7: Geschlossenes Versiegelungsgefäß mit externen Thermoelementen und angeschlossenem Druckaufnehmer

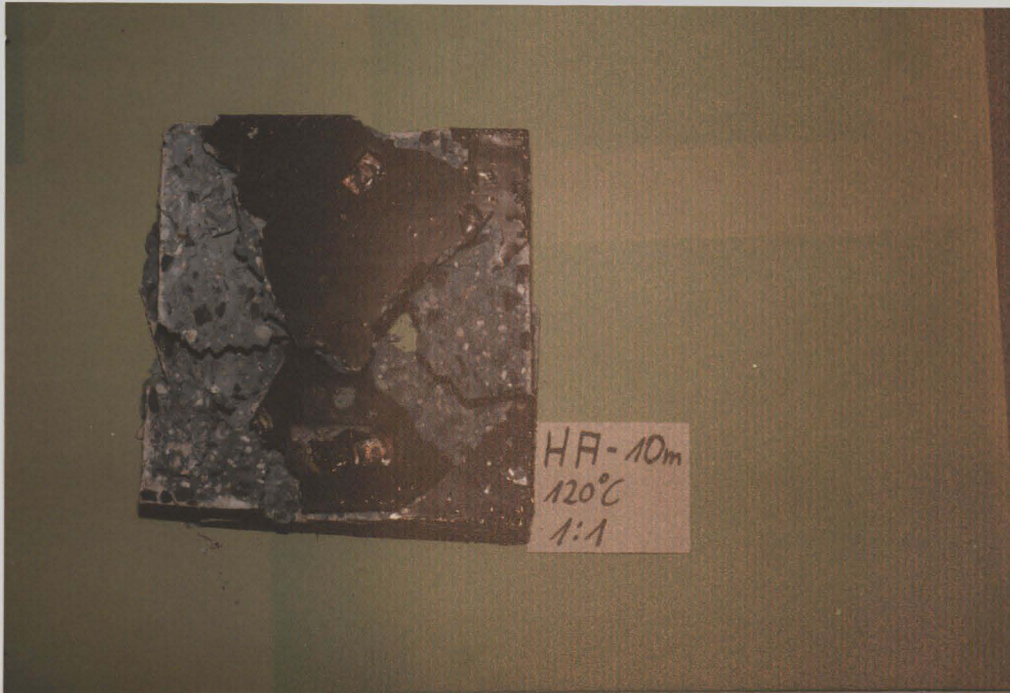


Bild 8: Beschichtete Probe nach dem Versuch

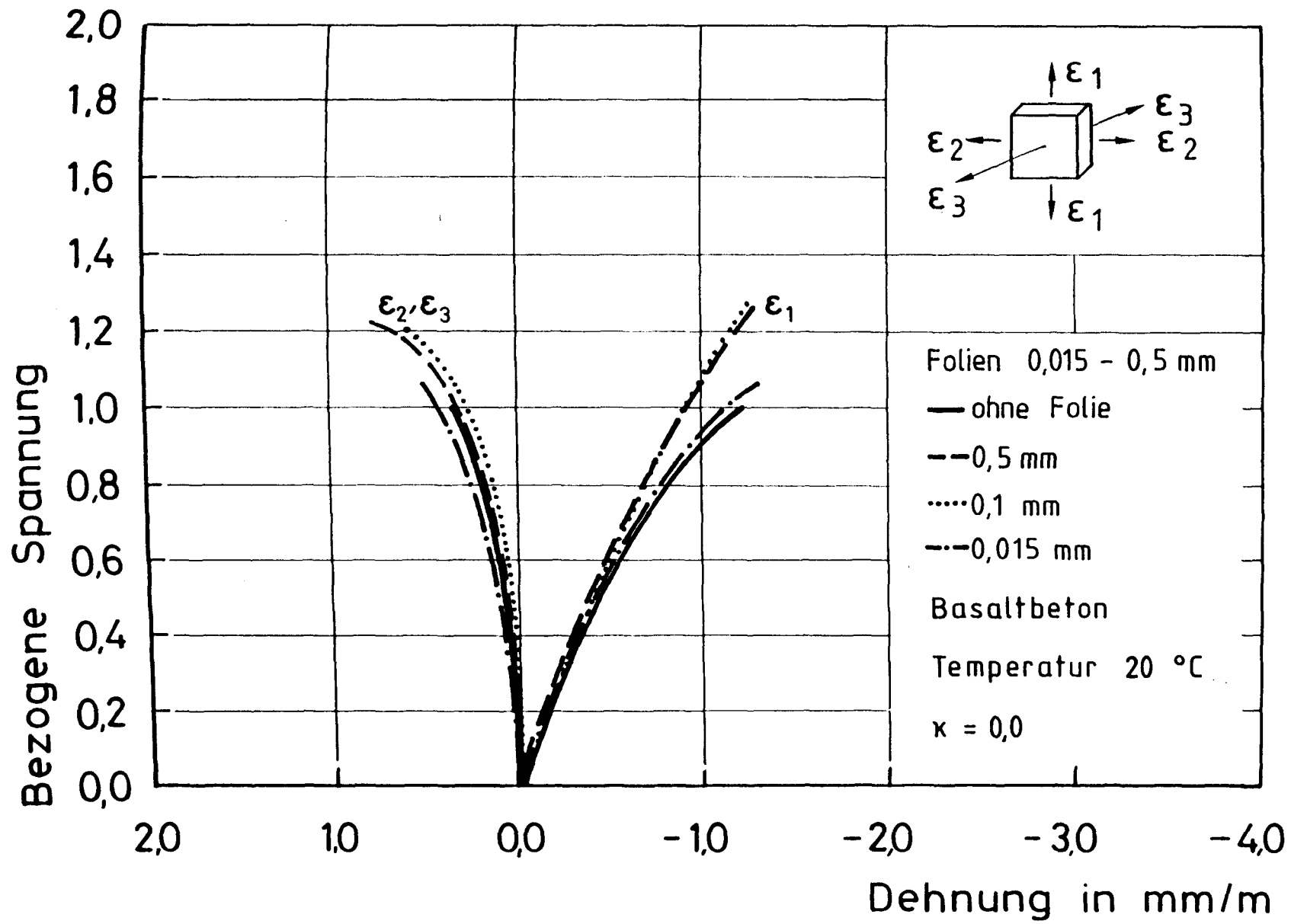


Bild 9: Spannungs-Dehnungs-Linien mit Folien

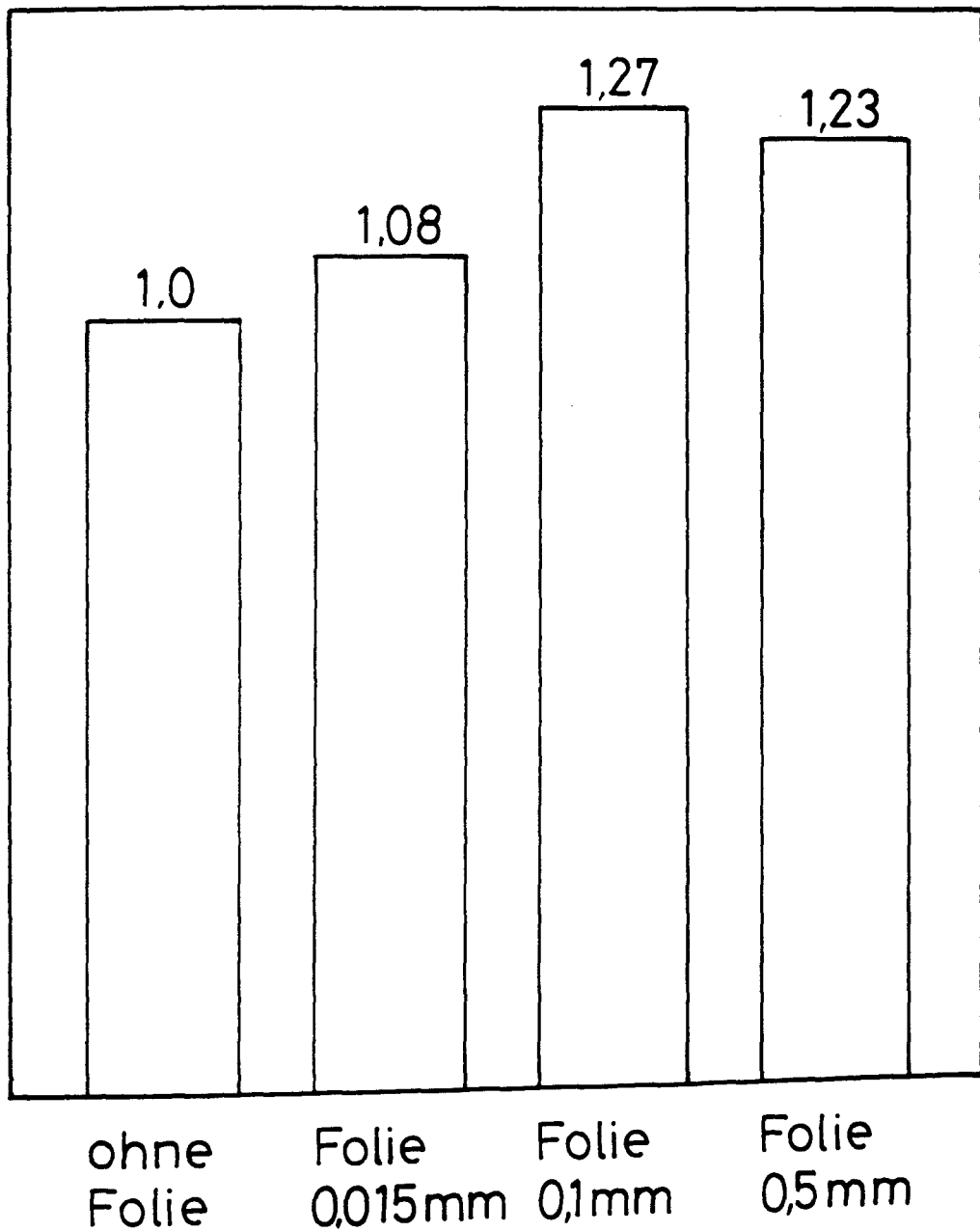


Bild 10: Vergleich der mit zwischengelegten Folien bestimmten Festigkeiten

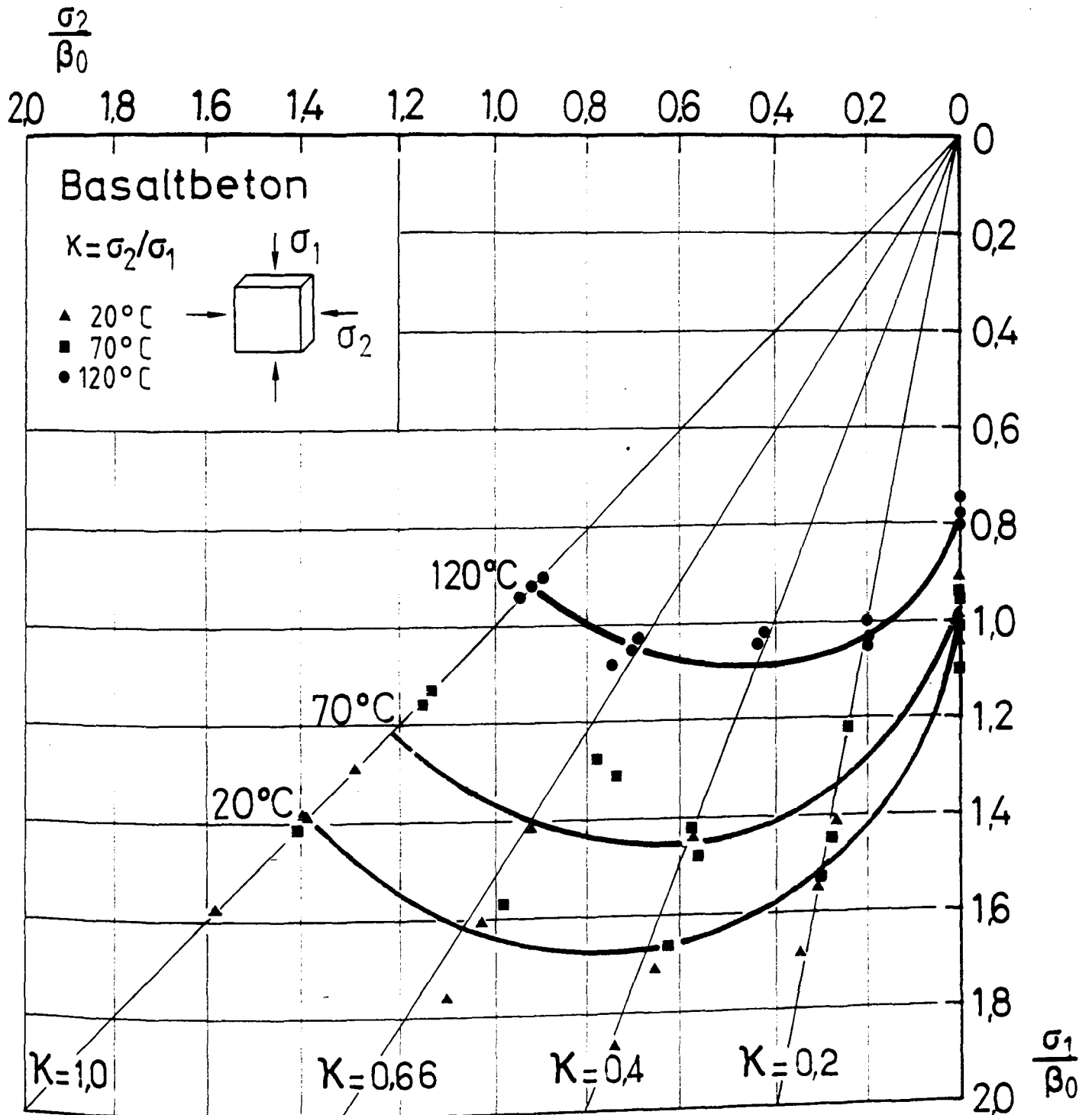


Bild 11: σ_1 - σ_2 -Linien

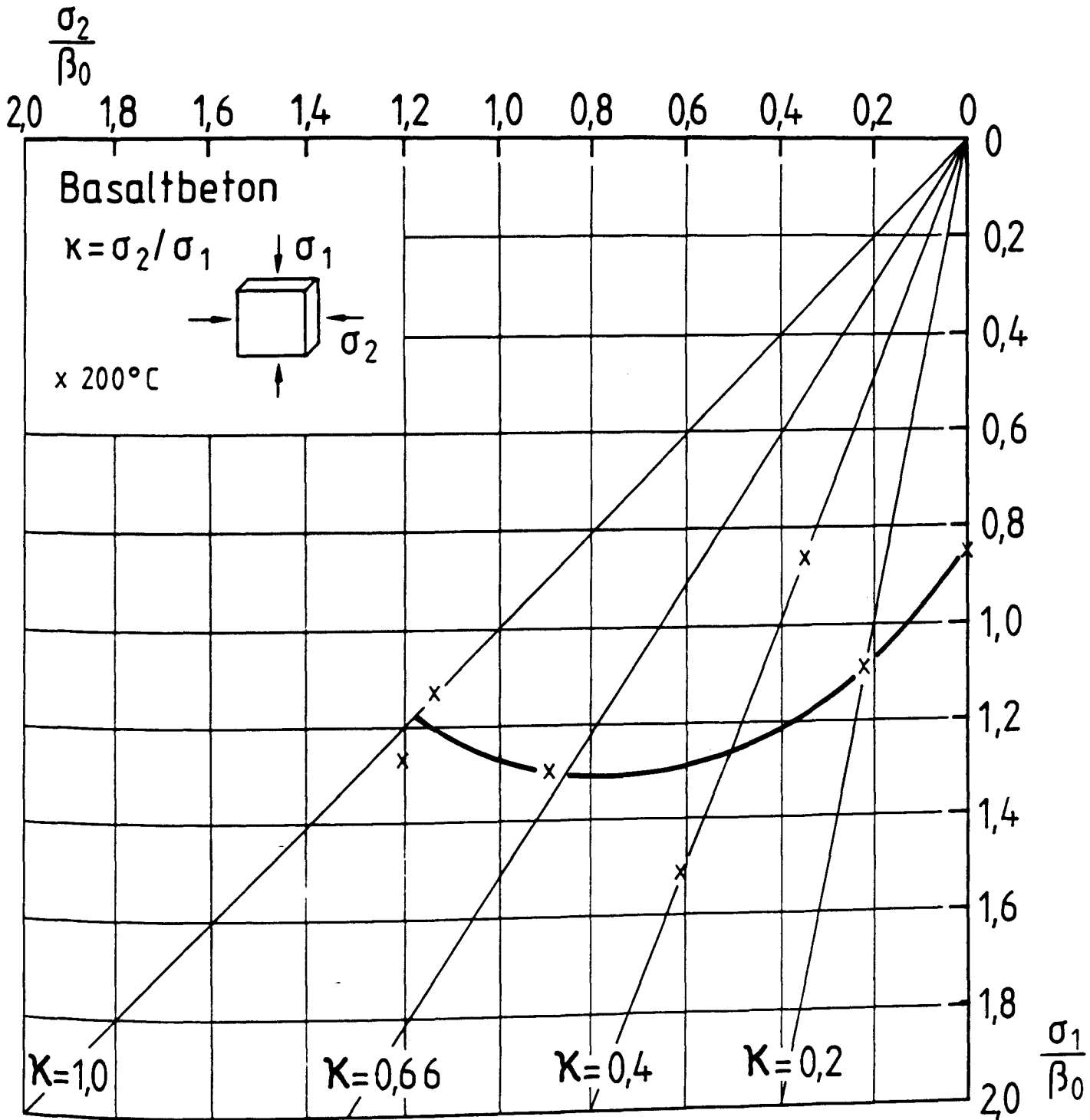


Bild 12: σ_1 - σ_2 -Linie für 200°C

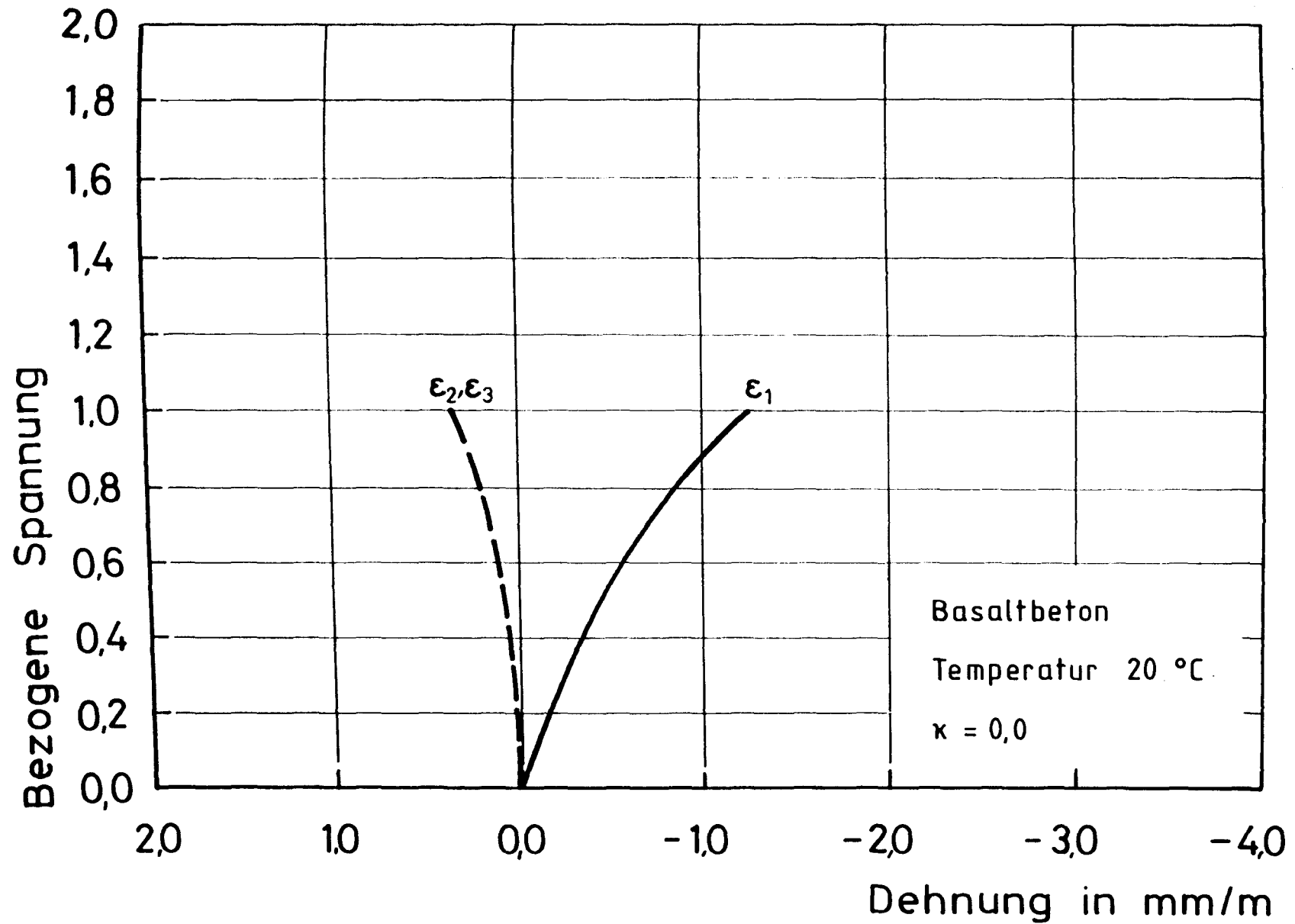


Bild 13: Spannungs-Dehnungs-Linien

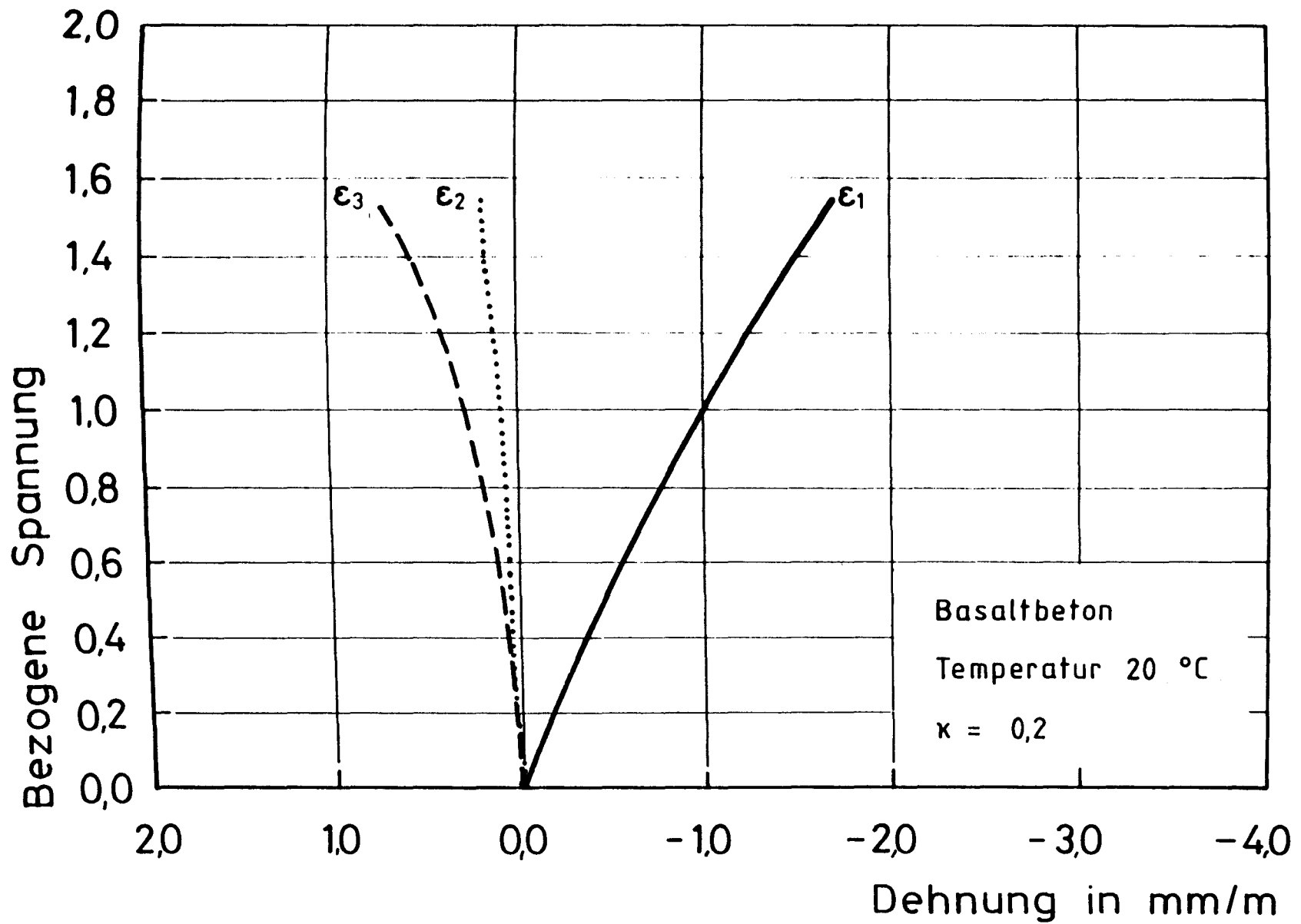


Bild 14: Spannungs-Dehnungs-Linien

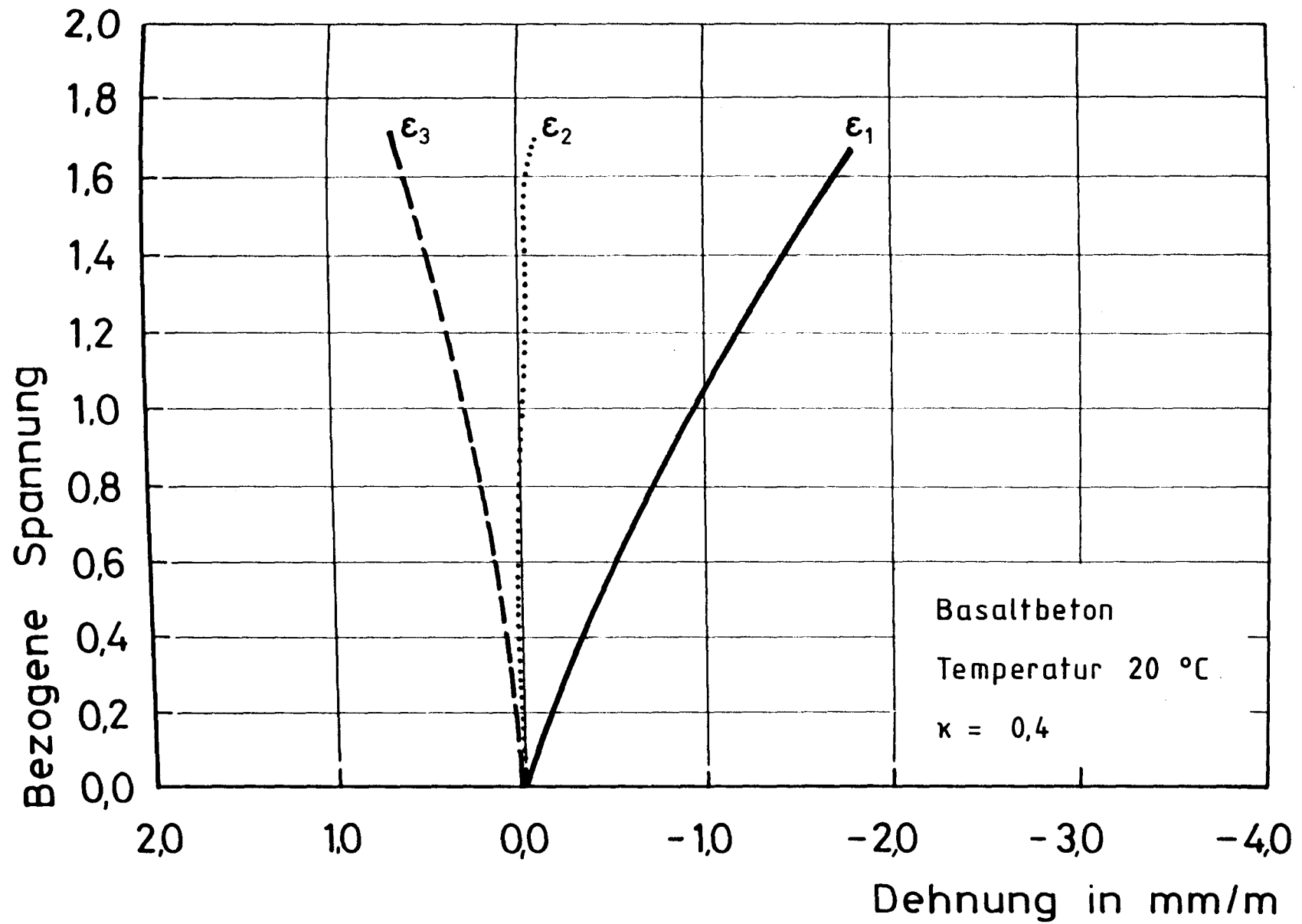


Bild 15: Spannungs-Dehnungs-Linien

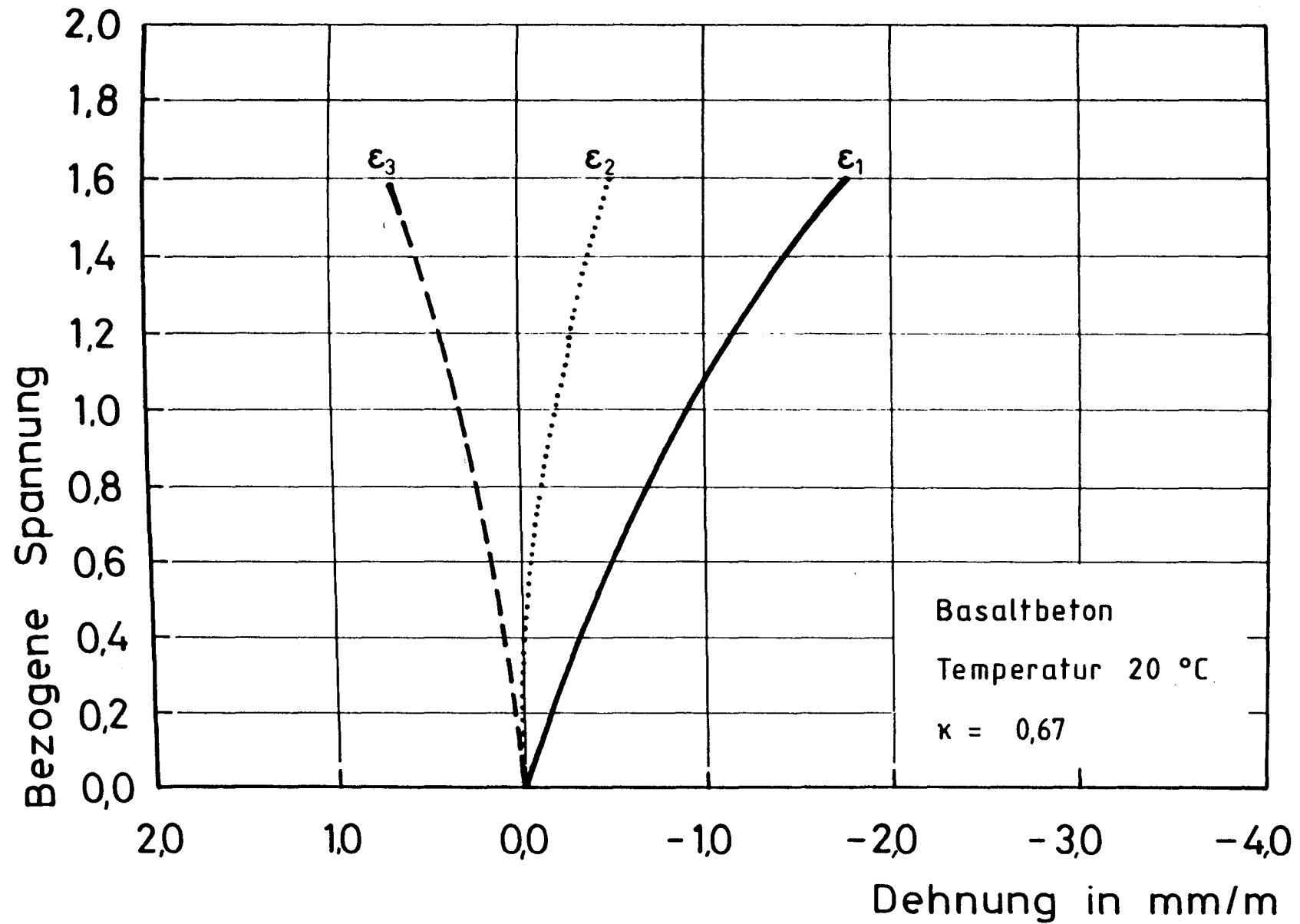


Bild 16: Spannungs-Dehnungs-Linien

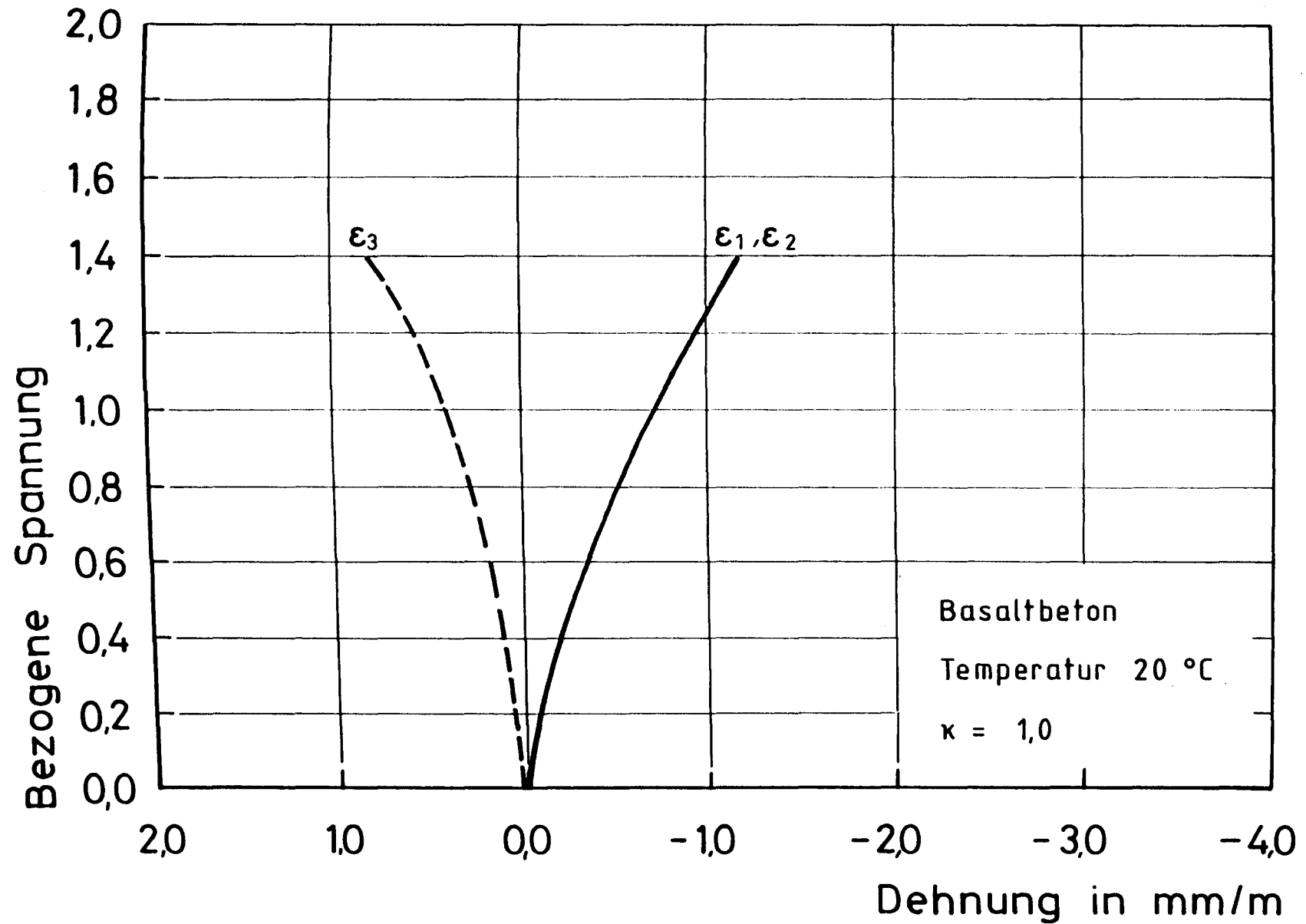


Bild 17: Spannungs-Dehnungs-Linien

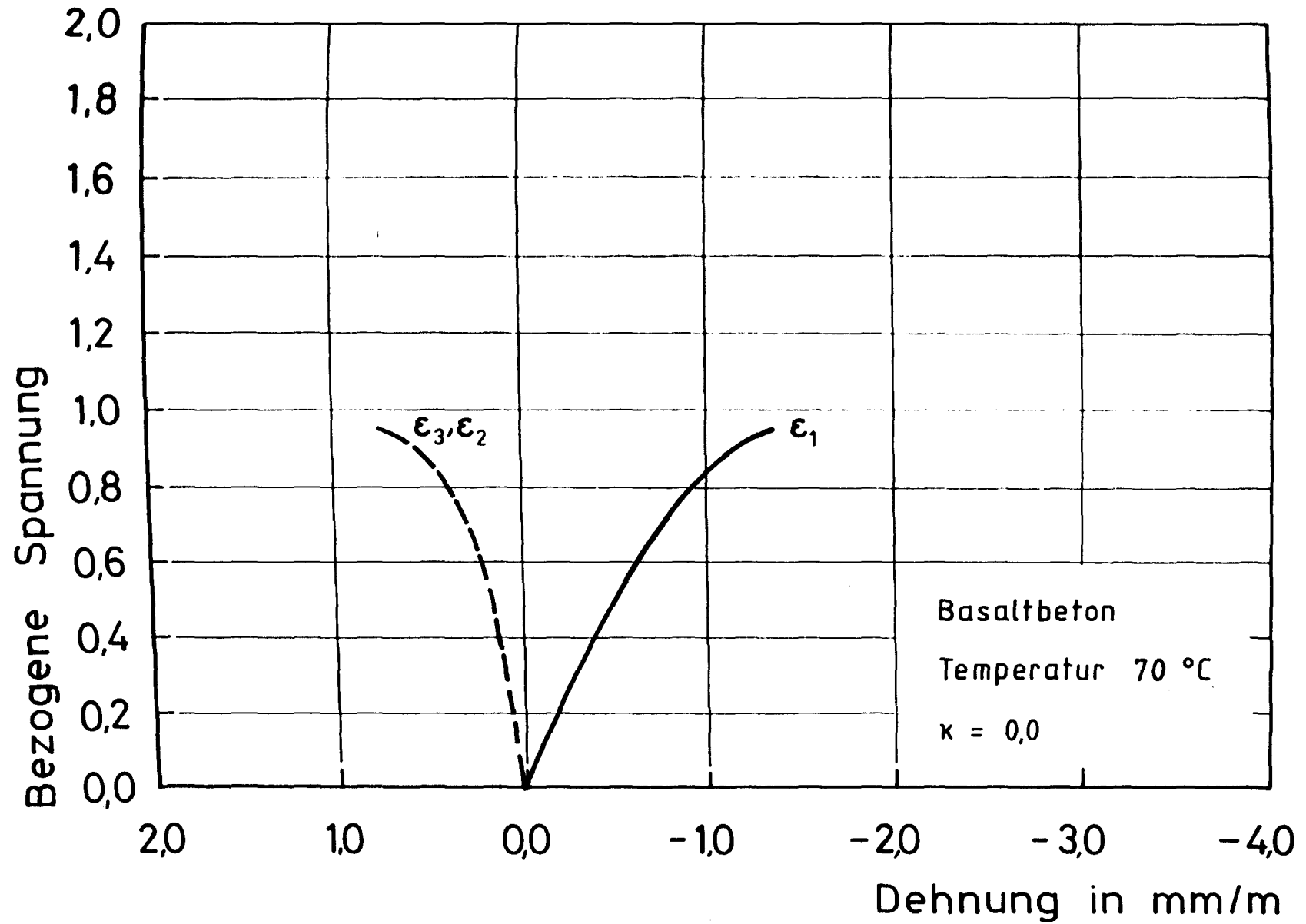


Bild 18: Spannungs-Dehnungs-Linien

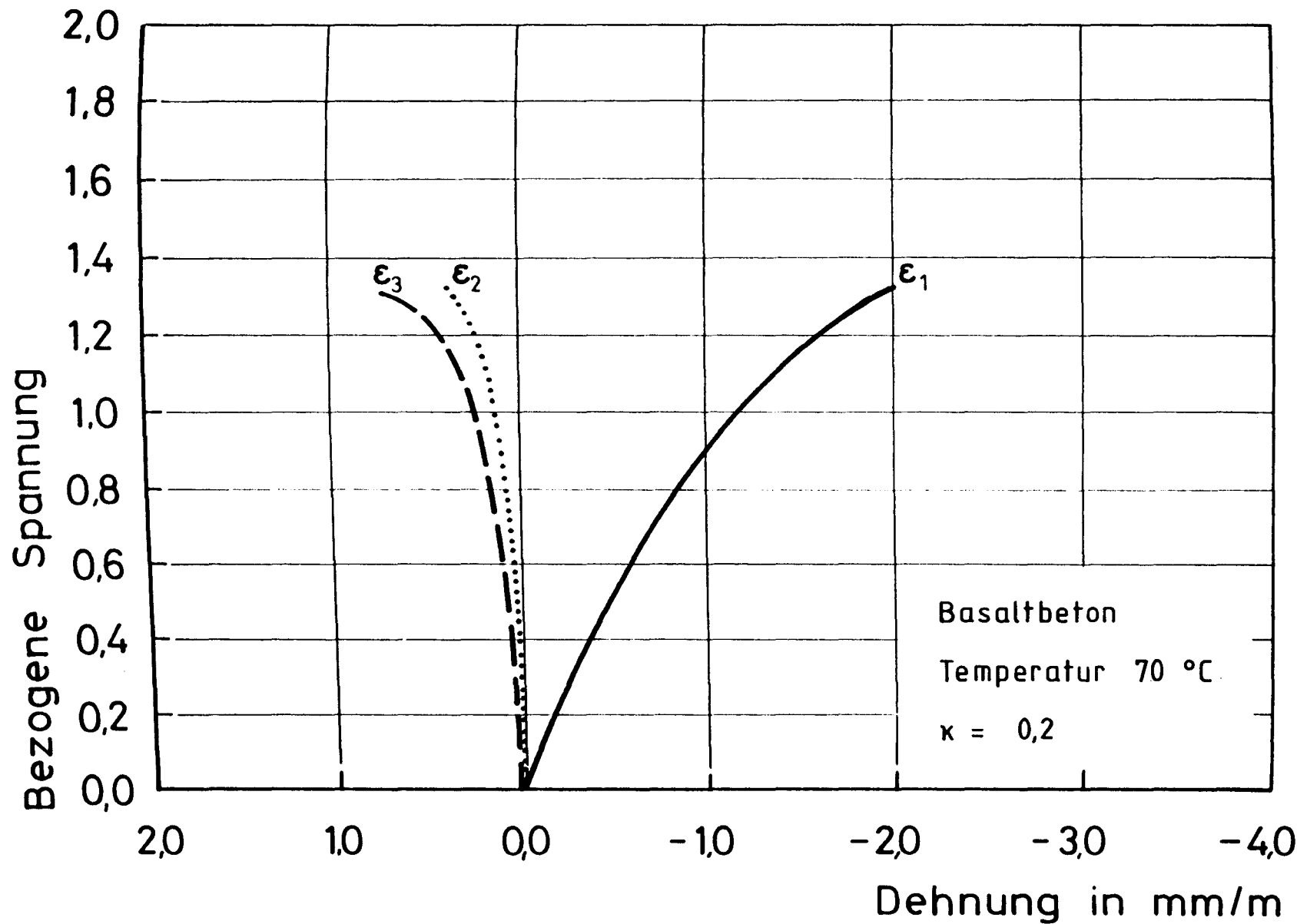


Bild 19: Spannungs-Dehnungs-Linien

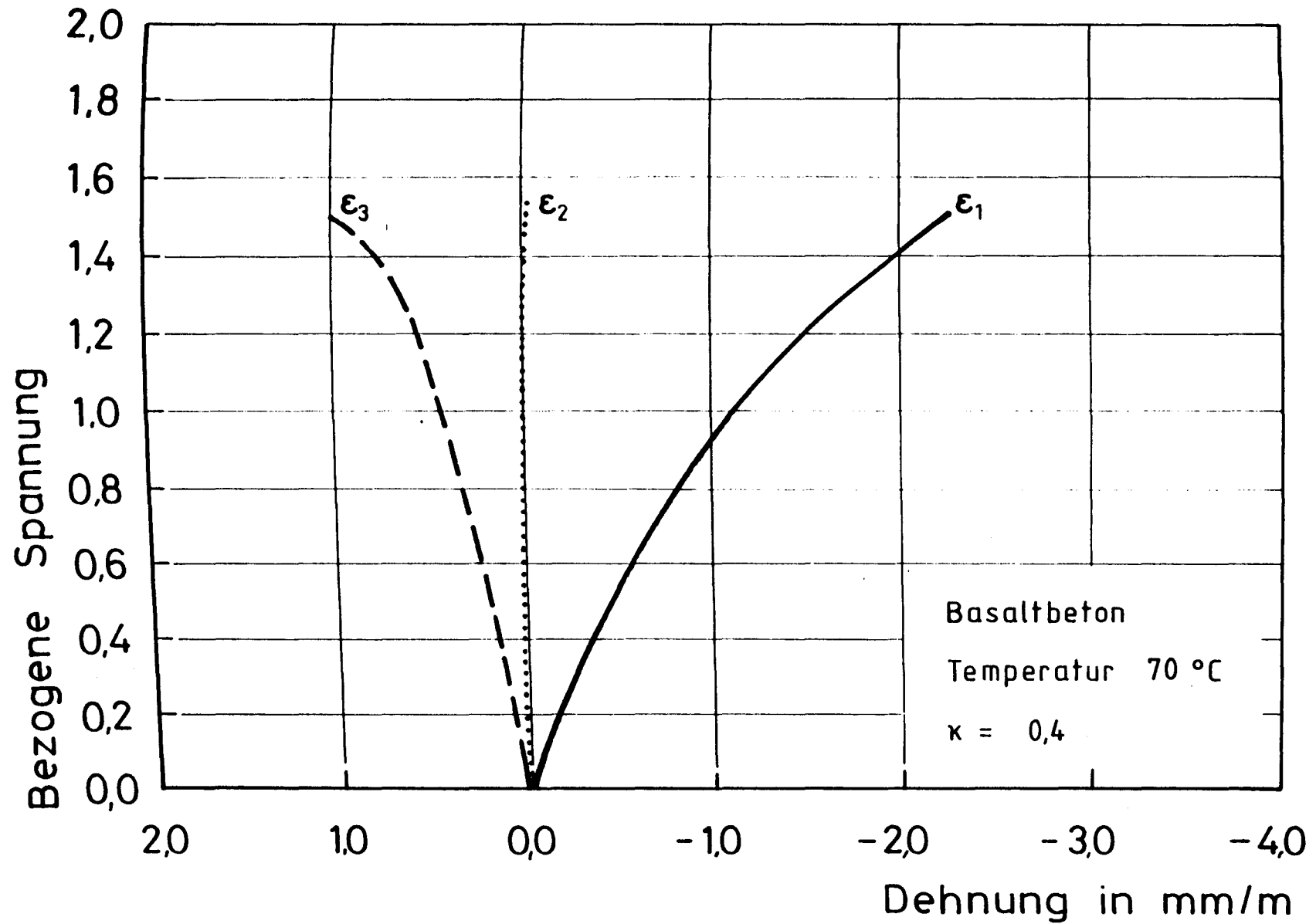


Bild 20: Spannungs-Dehnungs-Linien

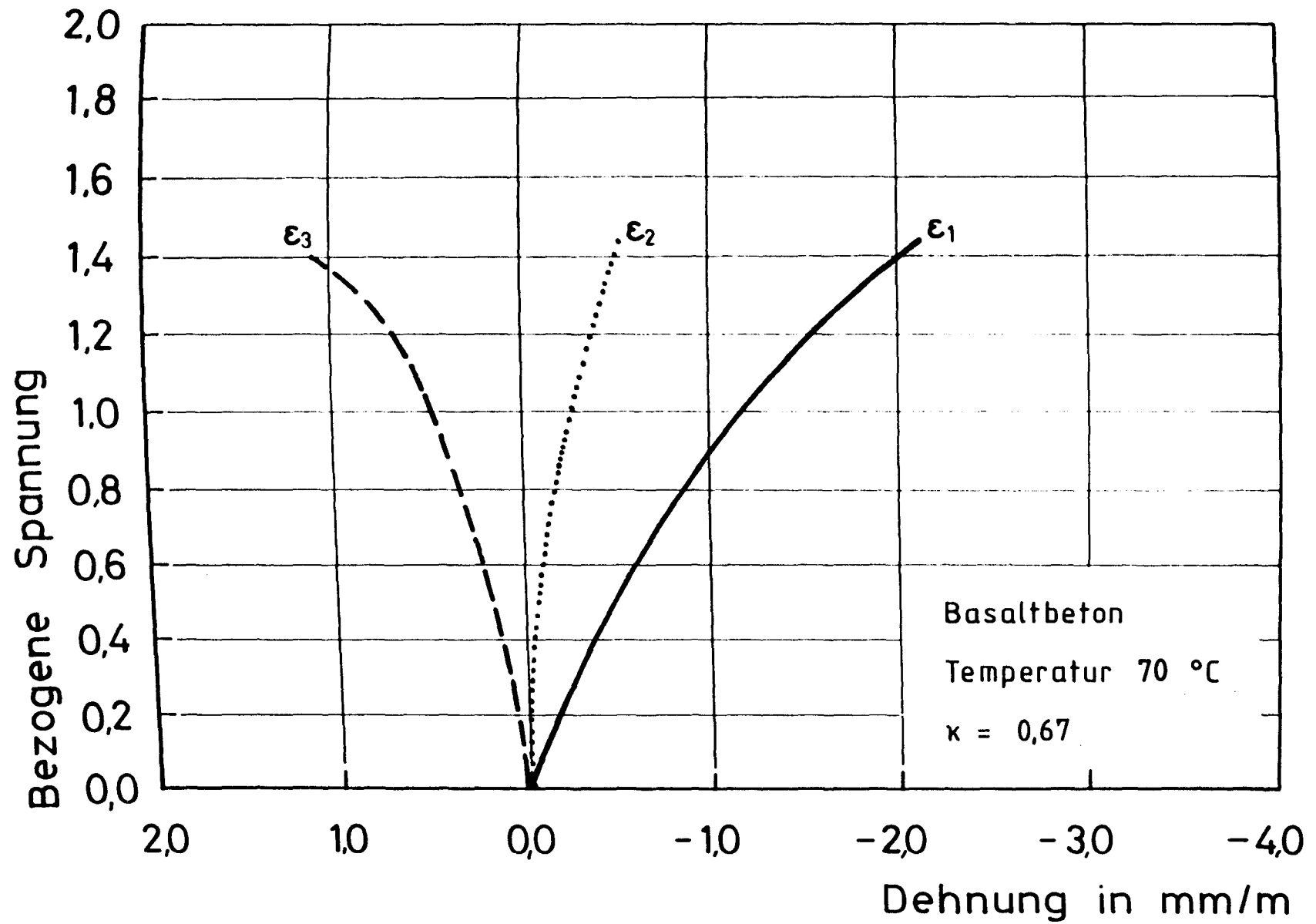


Bild 21: Spannungs-Dehnungs-Linien

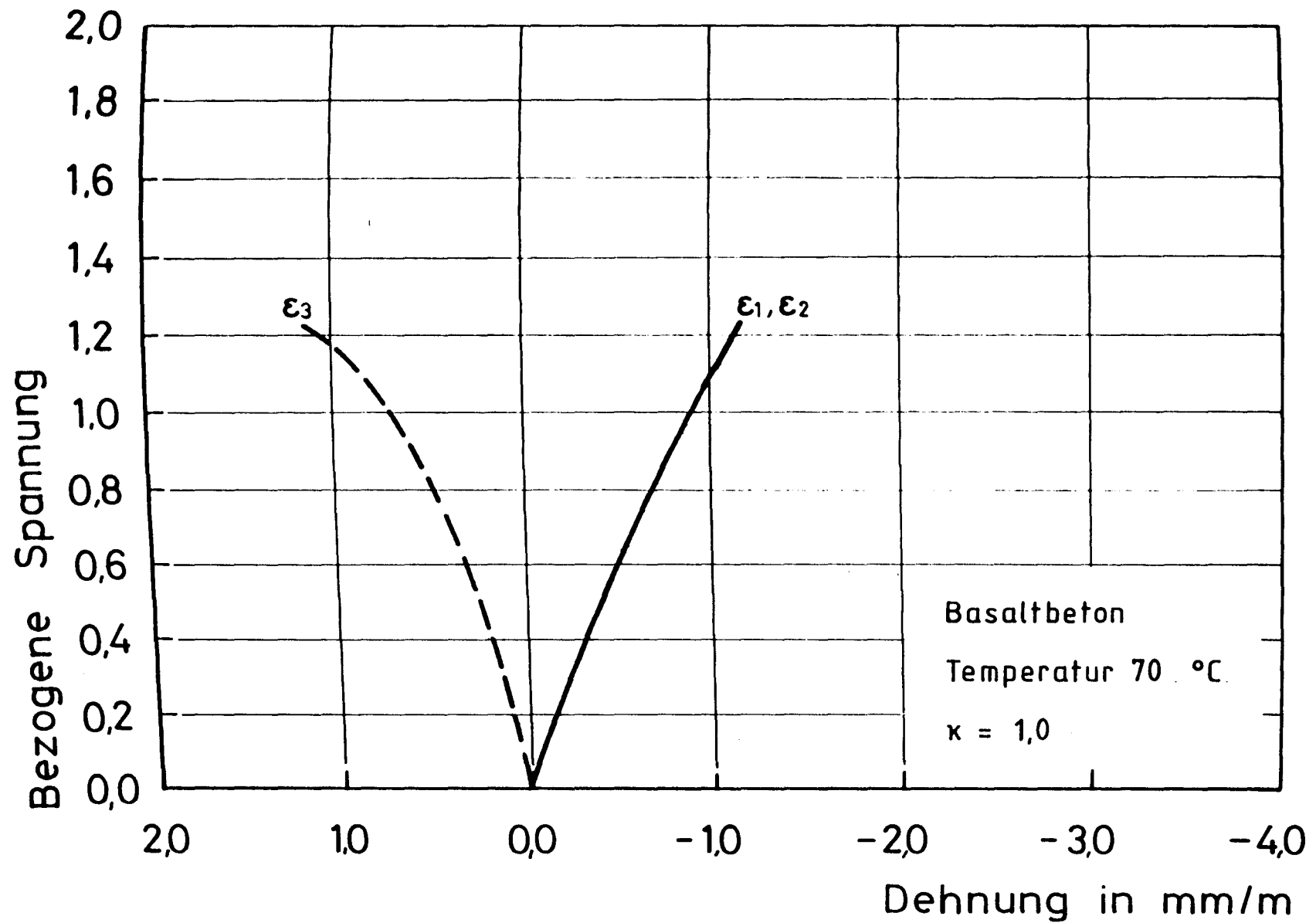


Bild 22: Spannungs-Dehnungs-Linien

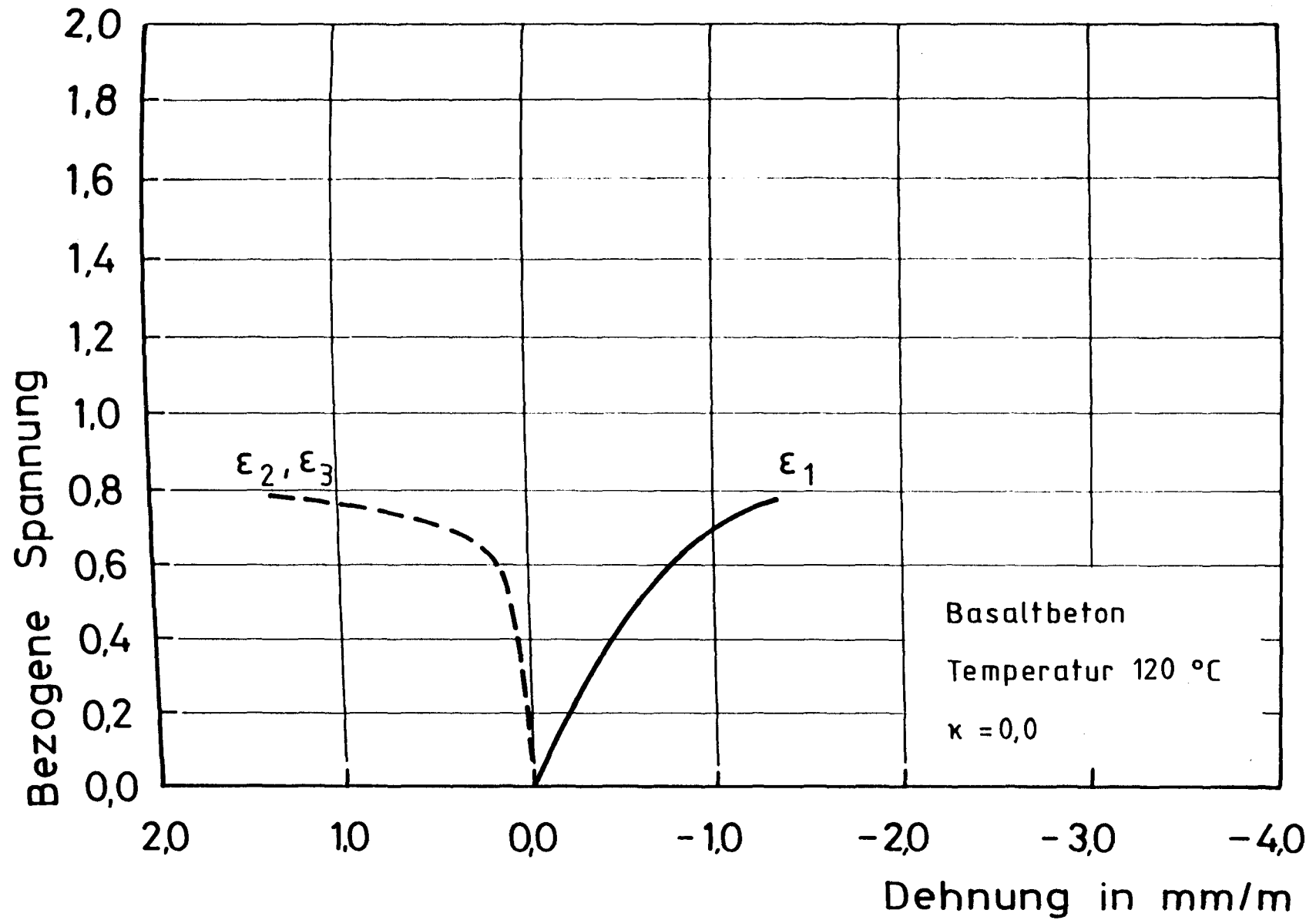


Bild 23: Spannungs-Dehnungs-Linien

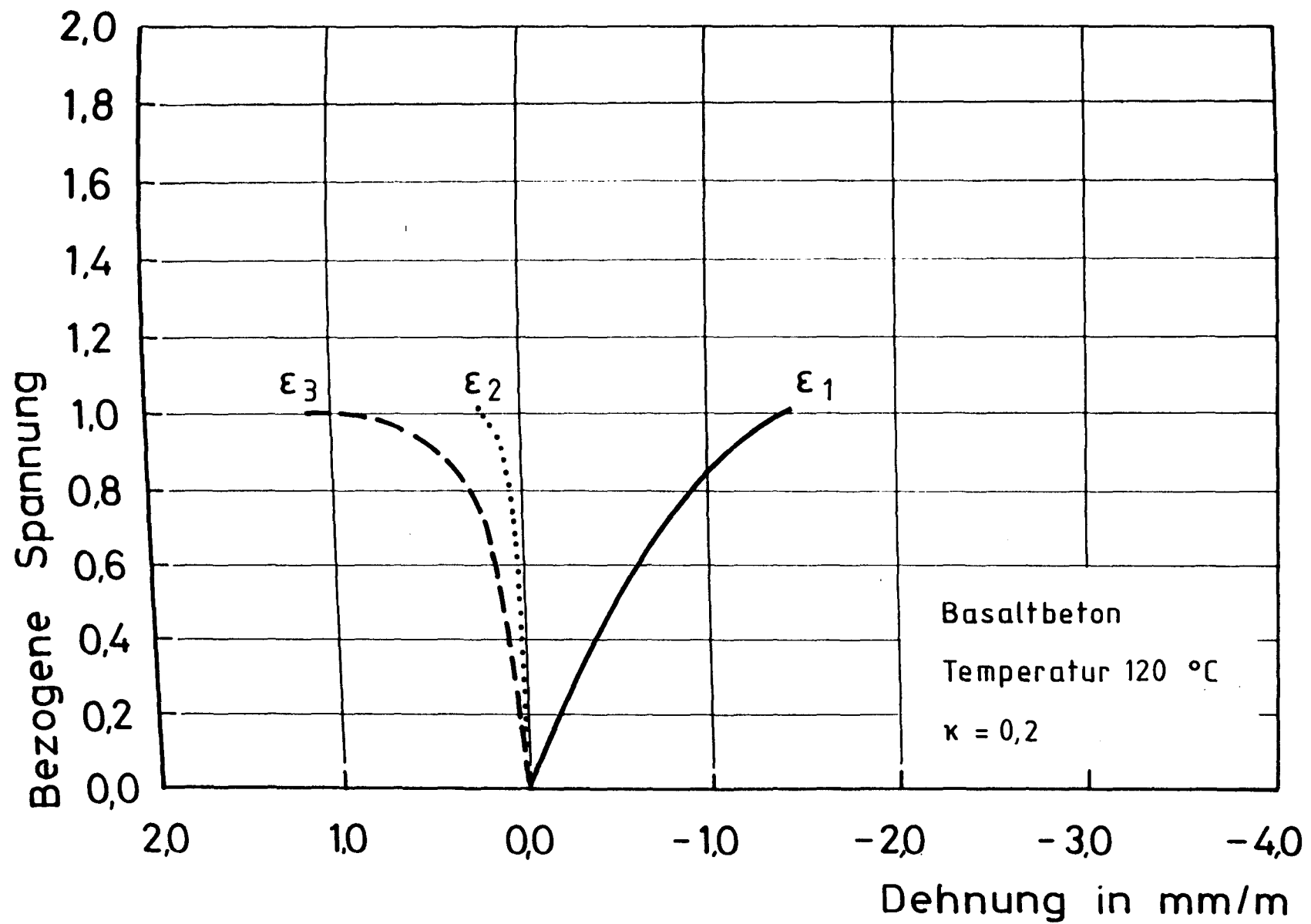


Bild 24: Spannungs-Dehnungs-Linien

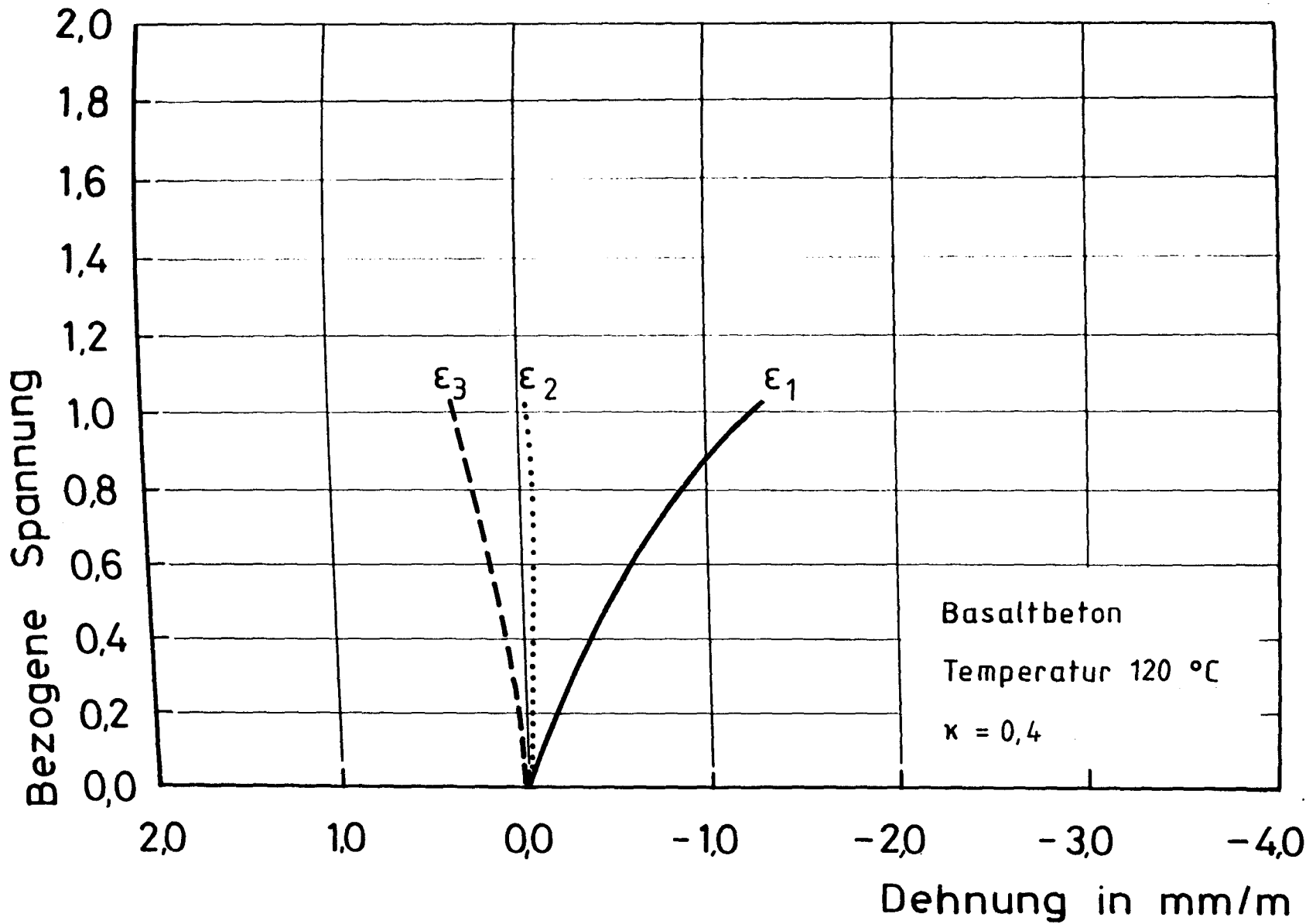


Bild 25: Spannungs-Dehnungs-Linien

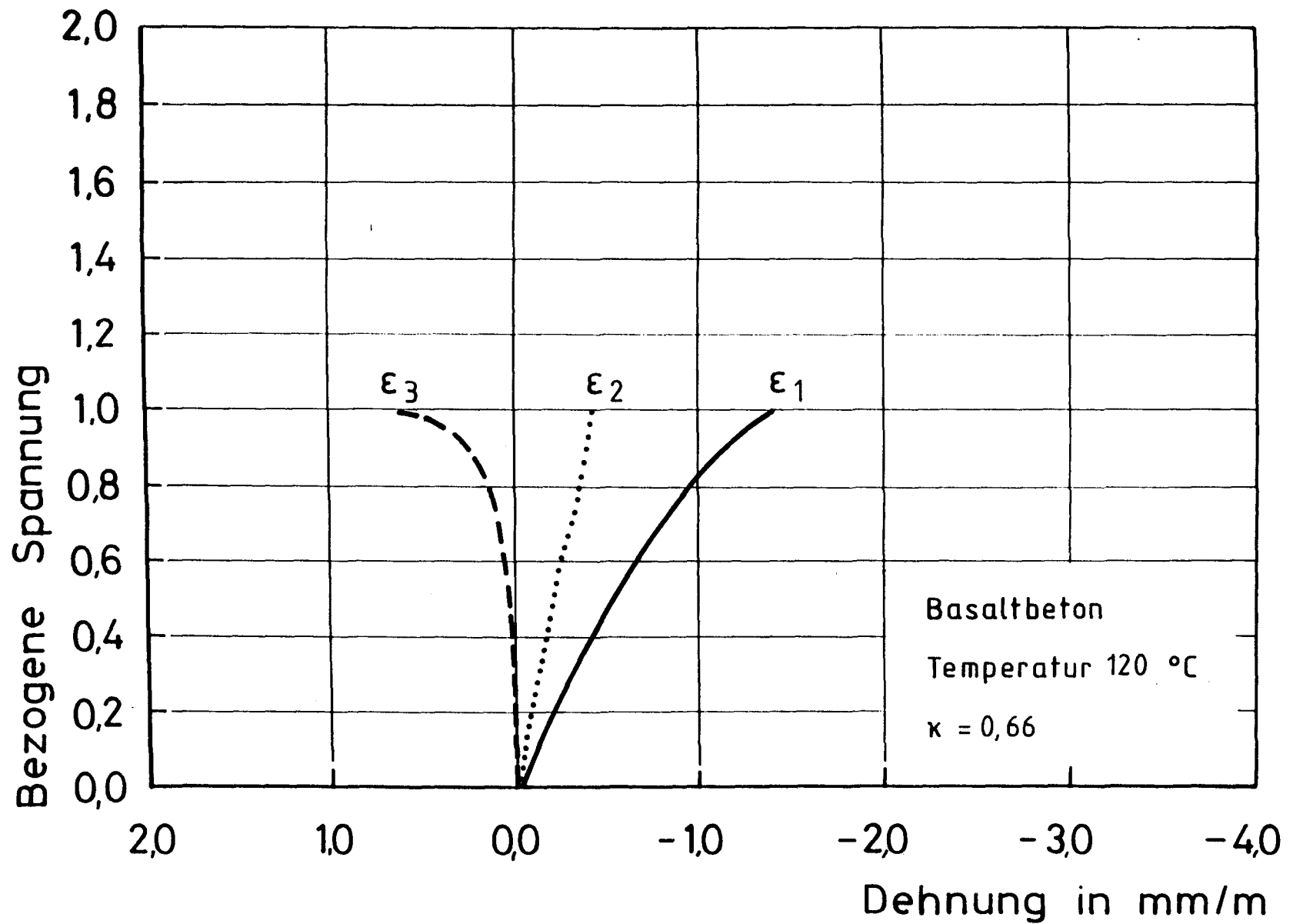


Bild 26: Spannungs-Dehnungs-Linien

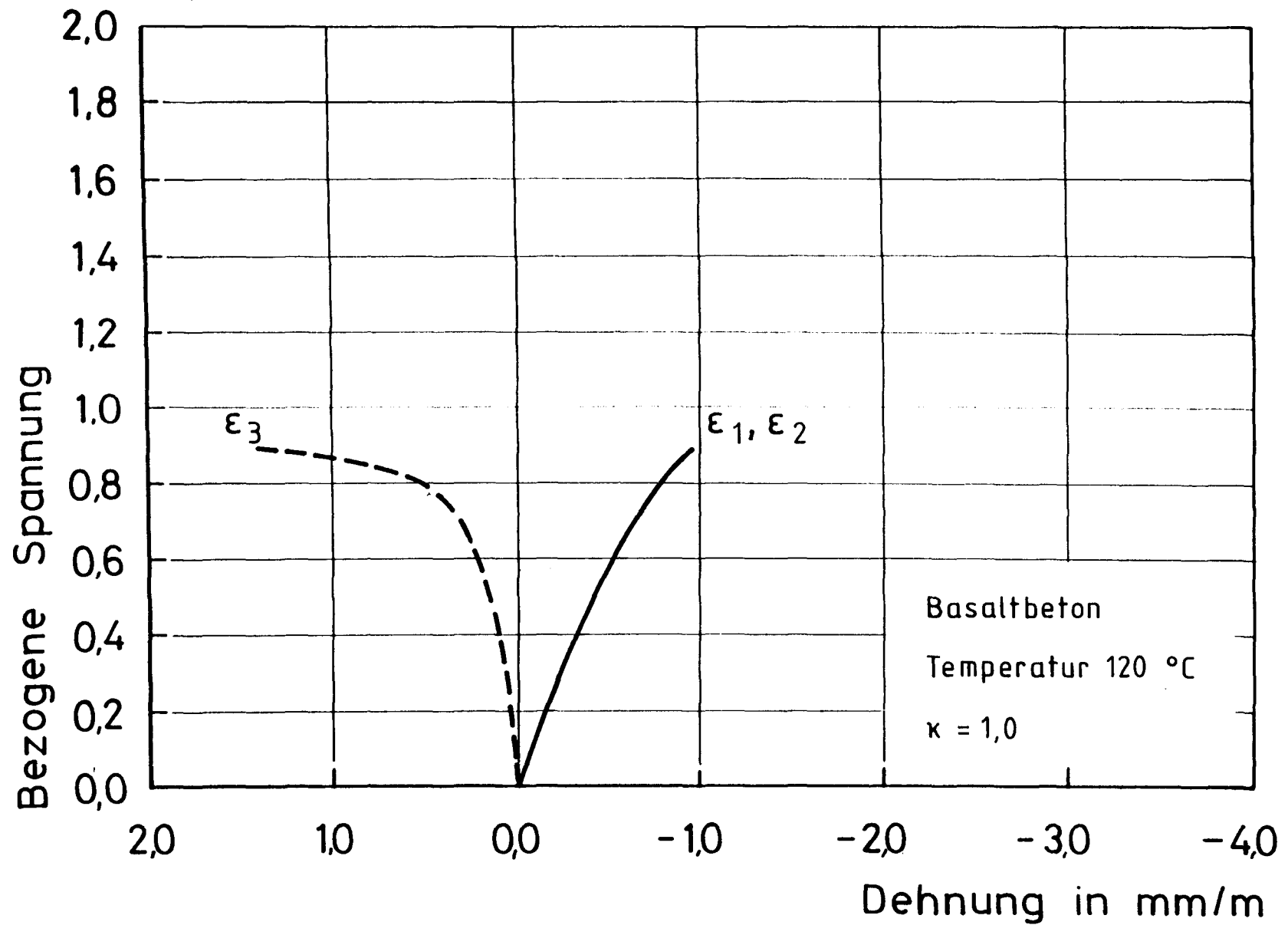


Bild 27: Spannungs-Dehnungs-Linien

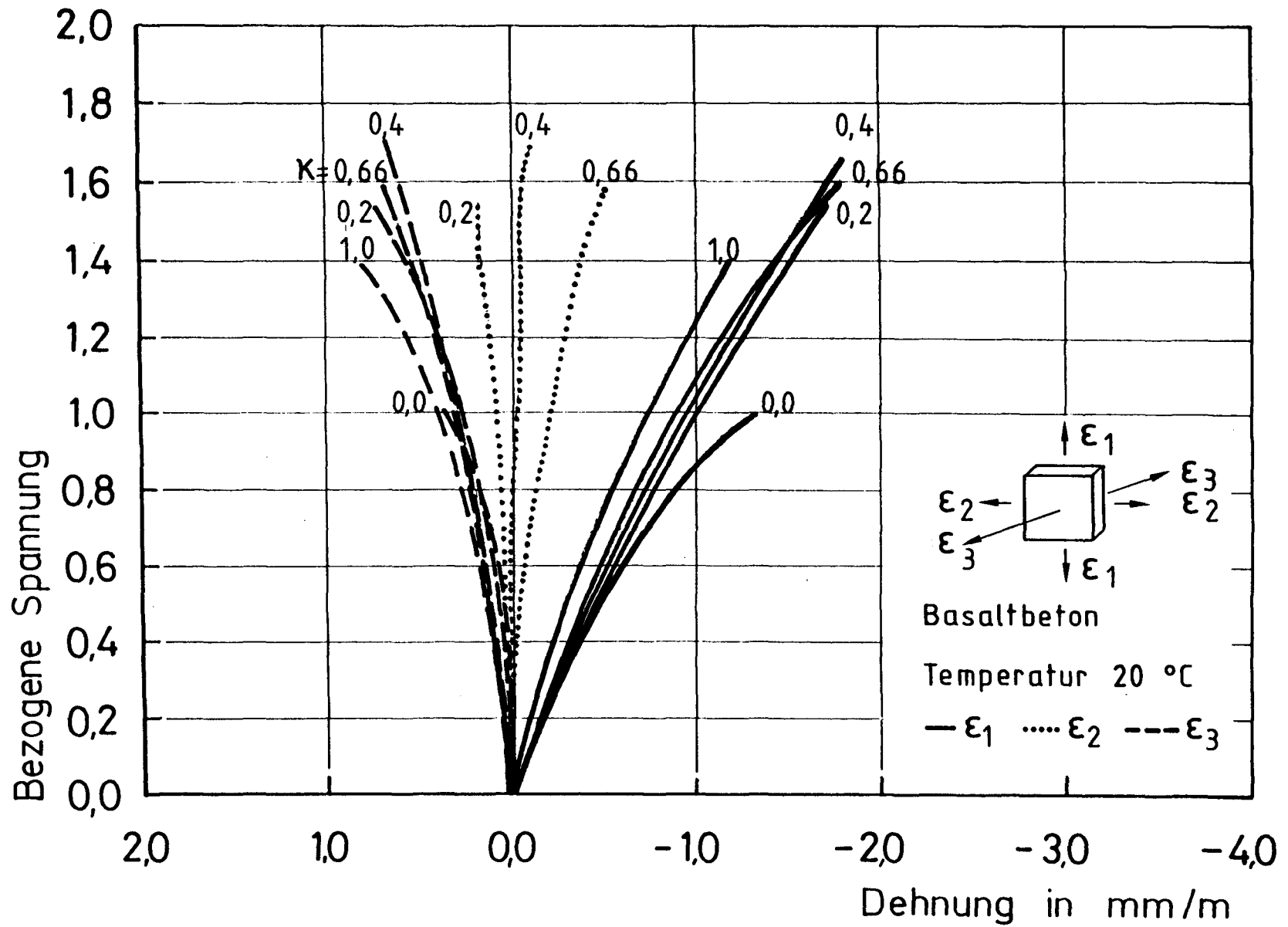


Bild 28: Spannungs-Dehnungs-Linien

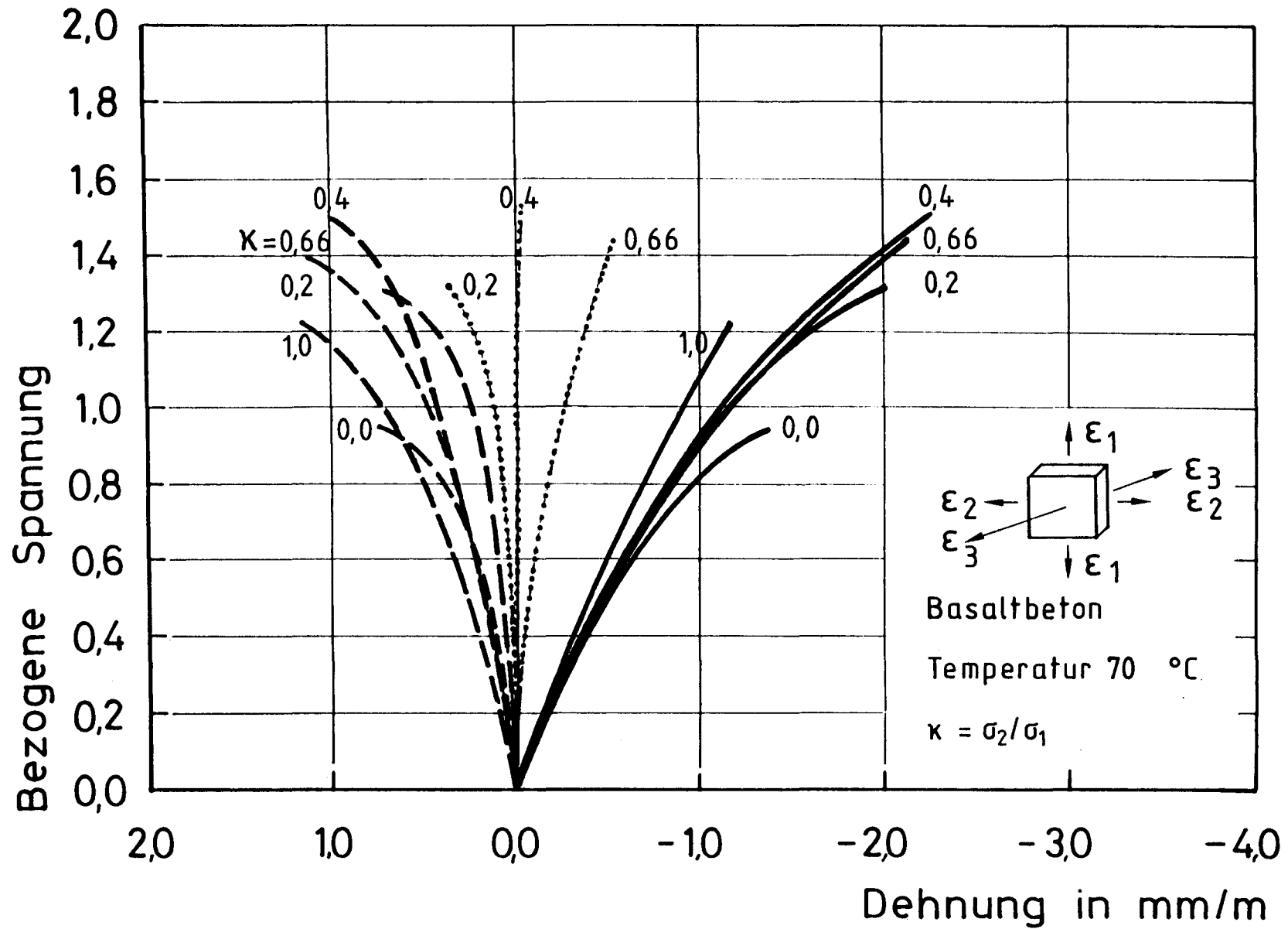


Bild 29: Spannungs-Dehnungs-Linien

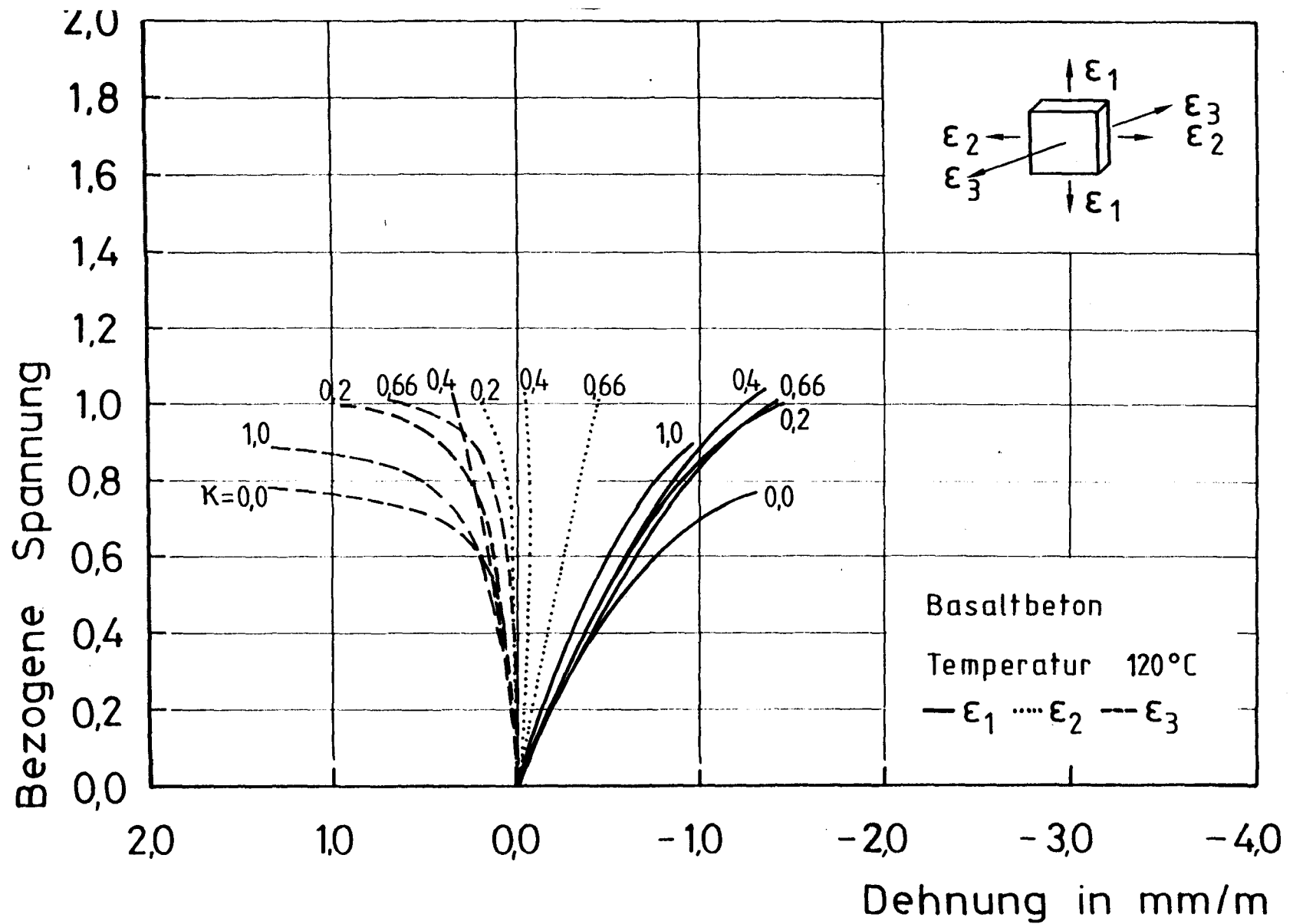


Bild 30: Spannungs-Dehnungs-Linien